

Bc. Bednář Jan

Měřicí jednotka jízdních stavů modelu RC automobilu

Measurement Device for Ride Parameters of RC Car Model

Diplomová práce

Vedoucí práce:
Ing. Jiří Kulhánek, Ph.D.

Ostrava 2021

Bibliografický záznam

Autor: Jan Bednář, BED0098

Název práce: Měřicí jednotka jízdních stavů modelu RC automobilu

Studijní program: N0714A270003 Mechatronika

Vedoucí práce: Ing. Jiří Kulhánek, Ph.D.

Akademický rok: 2020/2021

Počet stran: 71

RC model, Jízdní stavy, Měřicí jednotka, Arduino DUE, Simulace

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

BEDNÁŘ, J. *Měřicí jednotka jízdních stavů modelu RC automobilu: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra automatizační techniky a řízení, 2021, 71 s. Vedoucí práce: Ing. Jiří Kulhánek, Ph.D.

Tato diplomová práce pojednává o návrhu miniaturní měřicí jednotky jízdních stavů rádiově řízeného automobilu založené na systému Arduino DUE. Práce se primárně zabývá vybavením pro zajištění autonomnosti jízdních stavů v podobě testu brzdné dráhy a vyhýbacího manévru zvaného losí test. Dále se práce zabývá popisem podvozkové platformy, popisem a návrhem řízení jízdních stavů, principem jejich dálkového ovládání a testováním navrženého systému. Okrajově práce přibližuje také problematiku přepracování současné podvozkové platformy na nezávislý pohon všech kol.

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

BEDNÁŘ, J. *Measurement Device for Ride Parameters of RC Car Model: Diploma Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Control Systems and Instrumentation, 2021, 71 p. Thesis head: Ing. Jiří Kulhánek, Ph.D.

This diploma thesis deals with the design of a miniature measuring unit for driving maneuvers of a radio-controlled car based on the Arduino DUE system. The thesis primarily deals with the equipment for ensuring the autonomy of driving maneuvers in the form of a test of the braking distance and an avoidance maneuver called the moose test. Furthermore, the thesis deals with the description of the chassis platform, description and design of control of driving maneuvers, the principle of their remote control and testing of the proposed system. Lastly this thesis also brings closer the problematics of redesigning the current chassis platform to independent all-wheel drive system.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	6
1 Úvod	12
2 Model RC automobilu.....	13
2.1 Podvozek	13
2.1.1 Zavěšení a uložení kol	13
2.1.2 Karoserie a kola	14
2.2 Pohonná jednotka	15
2.3 Servomotor a dálkové ovládání.....	16
2.4 Snímače a měřicí jednotka	17
2.4.1 Modul akcelerometru, gyroskopu a magnetometru	17
2.4.2 Světelné závory.....	18
2.4.3 Ohybové senzory	20
2.4.4 Měřicí jednotka.....	22
3 Princip vzdáleného ovládání.....	24
3.1 Rádiové vlny	24
3.2 Ovládání RC modelů	25
3.2.1 Modulace pomocí rozprostřeného spektra.....	25
3.2.2 Ovládání motoru.....	26
4 Hodnocení dynamiky jízdy.....	28
4.1 Základní měřené veličiny.....	28
4.1.1 Čas a dráha	28
4.1.2 Rychlost	28
4.1.3 Zrychlení	29
4.1.4 Dostředivá síla	29
4.1.5 Přetížení.....	30
4.2 Manévry	30
4.2.1 Rozjezd a zastavení.....	31
4.2.2 Losí test.....	31
4.3 Odpor proti pohybu.....	32
4.3.1 Odpor stoupání.....	34
4.3.2 Celkový jízdní odpor	34

5	Možnosti úpravy modelu a řídicí jednotky	36
5.1	Uložení motorů.....	37
5.1.1	Uložení motorů ve stejné rovině jako osa kola	37
5.1.2	Excentrické uložení motorů na rovině kolmé vůči rovině osy kola.....	39
6	Realizace autonomních stavů	41
6.1	Řízení manévrů pomocí Arduina	41
6.1.1	Reléové jednotky	42
6.1.2	Zvuková signalizace.....	43
6.1.3	Stabilizace při jízdě	44
6.1.4	Jízdní stavy	44
6.2	Dálkové ovládání	49
6.2.1	Úpravy hardwarového řešení RC soupravy	49
6.2.2	Server-client komunikace	50
6.3	Testování platformy	54
6.3.1	Jízdní stav 1, manévr plyn-brzda.....	54
6.3.2	Jízdní stav 2, manévr losí test	61
6.4	Porovnání s matematickým modelem	64
7	Závěr	67
	Použitá literatura	69
	Poděkování	71

Seznam použitých zkratek a symbolů

2CH	Two-channel. dvou-kanálový,
3CH	Three-channel, tří-kanálový,
3D	Three Dimensional, trojrozměrný,
AM	Amplitude Modulation, amplitudová modulace,
AWGN	Additive White Gaussian Noise, aditivní bílý Gaussovský šum,
BEC	Battery Eliminating Circuit, stabilizátor napětí,
BER	Bit Error Ratio, poměr chybných a všech přijatých bitů,
BLDC	BrushLess Direct Current, bezkartáčový stejnosměrný motor,
CAD	Computer-Aided Design, počítačem podporované projektování,
CNR, C/N	Carrier-Noise Ratio, poměr nosná/šum,
DAC	Digital-Analog Converter, digitálně-analogový převodník,
EHF	Extremely High Frequency, mikrovlny,
ELF	Extremely Low Frequency, extrémně dlouhé vlny,
ESC	Electronic Speed Controller, elektronický regulátor otáček,
FLIR	Forward-looking infrared, dopředná infračervená kamera,
FM	Frequency Modulation, frekvenční modulace,
HF	High Frequency, krátké vlny,
I ² C	Inter-Integrated Circuit, dvouvodičová sériová sběrnice,
I/O	Input/Output, vstup/výstup,
IR	InfraRed, infračervený,
JTAG	Joint Test Action Group, systém komunikace se zařízením a jeho vzdálené testování,
LED	Light-Emitting Diode, elektroluminiscenční dioda,
LF	Low Frequency, dlouhé vlny,
Li-pol	Lithium-polymerový článek,
LiFePO ₄	Lithium Ferrous Phosphate, lithium-železo-fosfátový,
MF	Medium Frequency, střední vlny,
NiMH	Nickel-metal-Hydride, niklo-metal-hydridový článek,

PLA	polylactic acid, polymléčná kyselina,
PWM	Pulse Width Modulation, pulzně šířková modulace,
RC	Radio Controlled, rádiově řízený,
RXD, Rx	Receive data, příjem dat,
SHF	Super High Frequency, mikrovlny,
SNR, S/N	Signal-Noise Ratio, poměr signál/šum,
SPI	Serial Peripheral Interface, sériové periferní rozhraní,
SRAM	Static Random Access Memory, statická paměť s náhodným přístupem,
TXD, Tx	Transmit Data, přenos dat,
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter, univerzální asynchronní sběrnice,
UHF	Ultra High Frequency, ultra krátké vlny,
USB	Universal Serial Bus, univerzální sériová sběrnice,
VHF	Very High Frequency, velmi krátké vlny,
VLF	Very Low Frequency, velmi dlouhé vlny,
WiFi	Wireless Fidelity, bezdrátová technologie přenosu dat,
x	osa x,
y	osa y,
z	osa z,

A	ampér,
a	okamžité zrychlení,
a_p	průměrné zrychlení,
a_d	dostředivé zrychlení,
C	rychlost světla ve vakuu,
cm	centimetr,
c_x	součinitel odporu vzduchu,
d	průměr,
ds	derivace dráhy,
dt	derivace času,
dv	derivace rychlosti,
dB	decibel,
dB_i	zisk antény,
F/m	farad na metr,
F_d	dostředivá síla,
F_o	odstředivá síla,
F_k	celkový jízdní odpor,
f	frekvence, součinitel valivého odporu,
G	přetížení, tíhová síla,
GHz	gigahertz,
G_p	zisk přijímací antény,
G_v	zisk vysílací antény,
H/m	henry na metr,
Hz	hertz,
h	výška svahu,
J_{Ki}	momenty setrvačnosti kol,
k	zkracovací činitel,
kB	kilobajt,

kg	kilogram,
kHz	kilohertz,
km	kilometr,
kV	otáčky na volt,
kW	kilowatt,
kWh	kilowatt hodina,
kg/cm	kilogram na centimetr,
km/h	kilometr za hodinu,
L_{φ}	ztráty způsobené nepřesným zaměřením antény,
L_p	polarizační ztráty,
l	délka svahu vzdušnou čarou,
MHz	megahertz,
m	metr, hmotnost,
m/s	metr za sekundu,
m/s^2	metr za sekundu na druhou,
mm	milimetr,
n_{kv}	počet otáček na volt,
N/cm^2	Newton na centimetr čtvereční,
Nm	Newton-metr,
n_{max}	počet maximálních otáček,
O_f	valivý odpor,
O_v	vzdušný odpor,
O_s	odpor stoupání,
O_z	odpor zrychlení,
O_{zp}	posuvná složka odporu zrychlení,
O_{zr}	rotační složka odporu zrychlení,
ot/min	otáčky za minutu,
P_p	výkon přijímače,

P_v	výkon vysílače,
p	tlak, tlak vzduchu,
p_o	normální (atmosférický) tlak,
r	poloměr, poloměr otáčení,
rad/s	radián za sekundu,
r_{Ki}	poloměry kol,
S_x	čelní plocha automobilu,
s	vteřina, dráha, stoupání svahu,
s_1, s_2	dráha v určitých časových,
$s/60^\circ$	vteřin na 60° natočení,
T	Turn, závit,
t	čas, teplota vzduchu,
t_0	normální teplota vzduchu,
t_1, t_2	časové okamžiky,
THz	terahertz,
U_{BAT}	napětí akumulátoru,
$U_{\check{C}L}$	napětí článku,
U_{VCC}	napájecí napětí akcelerometru,
μm	mikrometr,
v	fázová rychlost, okamžitá rychlost,
\vec{v}	vektor rychlosti automobilu,
v_1, v_2	rychlost v určitých časových okamžicích
v_p	průměrná rychlost,
v_r	náporová rychlost proudění vzduchu,
\vec{v}_r	vektor náporové rychlosti vzduchu,
\vec{v}_v	vektor rychlosti nárazejícího větru,
V	volt,
W	watt,

x	vzdálenost,
α	alfa, úhel naklonění roviny,
λ	vlnová délka,
λ_0	vlnová délka vzduchu, vlnová délka zkrácené vlny,
ε	permitivita látky,
ε_0	permitivita vakua,
ε_r	relativní permitivita látky,
π	Ludolfovo číslo,
ω	úhlová frekvence,
μ	permeabilita látky,
μ_0	permeabilita vakua,
μ_r	relativní permeabilita látky,
ρ	měrná hmotnost vzduchu,
Δs	změna dráhy,
Δt	změna času,
Δv	změna rychlosti.

1 Úvod

Tato práce se zabývá návrhem systému autonomních jízdních stavů pro rádiově ovládaný model skutečného automobilu Studentcar SCX v měřítku 1:10. Jízdní testy představují důležitou součást hodnocení jízdních vlastností automobilů. V zásadě za nejdůležitější jízdní manévr je považován vyhýbací manévr při prudkém zatočení před neočekávanou překážkou. Laickou veřejností je nazýván také losí test podle stejnojmenného sudokopytníka. Oficiálně se jedná o jízdní test při prudké změně pruhu prováděný na suché vozovce a normovaný dle ISO 3888-2. Losí test je schopen velmi dobře prověřit ztrátu stability při snaze uživatele zabránit kolizi, kdy může dojít až k převrácení automobilu. V začátcích testování se skutečně stávalo, že se některé modely automobilů převrátily. V návaznosti na takto nepříznivé renomé se automobilky začaly více zajímat o problematiku odvrácení kolize a mnoho modelů od té doby bývá vybaveno systémem ESP. Dnes se již jedná o standardní vybavení nových automobilů.

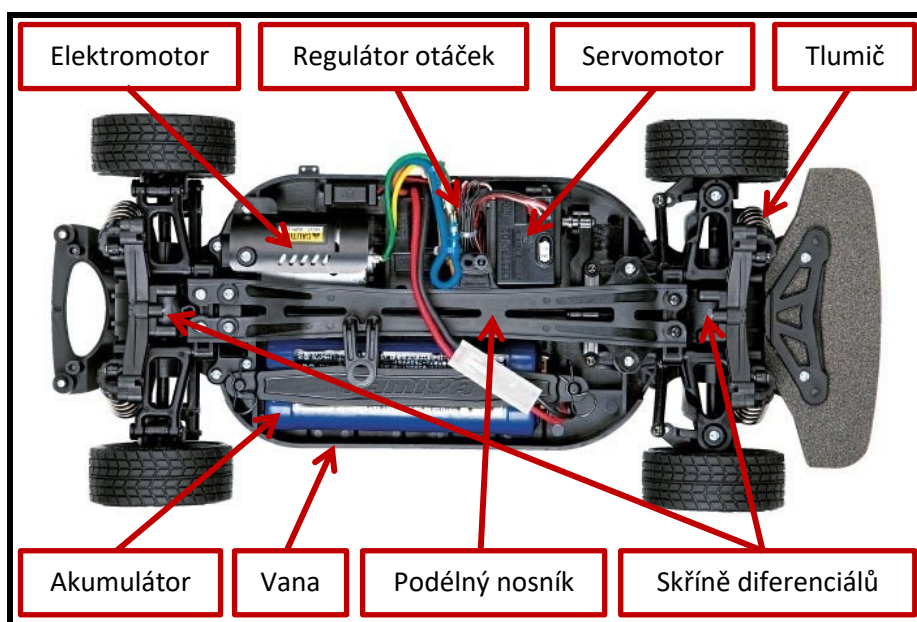
Cílem této práce je úprava a návrh měřicí jednotky a podvozkové platformy rádiově řízeného automobilu za účelem autonomně prováděných jízdních testů. S tímto účelem je tak v práci proveden návrh a realizace řídicí struktury pohonné jednotky a servomotoru, a také dálkové ovládání jízdních manévřů skrze wifi komunikaci typu server-client. Pro samotné testování jsou zvoleny dva jízdní testy v podobě testu plyn-brzda, druhým je právě výše zmíněný losí test. Jízdní stavy nejsou autonomní v pravém slova smyslu, nýbrž jsou na pevně naprogramovány v měřicí jednotce. Vyhodnocení výsledků a řízení jízdních stavů zajišťuje měřicí jednotka založená na systému arduino. Systém je schopen měřit otáčky a zdvih jednotlivých kol, akceleraci ve všech osách a úhlovou rychlost rotace okolo všech os, úhel natočení při jízdě a úhel natočení kol.

2 Model RC automobilu

Jak už v práci zaznělo, testovací platformu již navrhnul a sestrojil pan inženýr Tomáš Chytil v rámci své diplomové práce *RC model jako testovací platforma jízdních stavů*. Platforma je založena na konvenčním podvozku silničního RC modelu od společnosti Tamiya. Podvozek byl fyzicky modifikován tak, aby bylo možné jej osadit strukturou senzorů. To mimo jiné zahrnuje záměnu původních součástí podvozku za jiné, navržené a vytisknuté na 3D tiskárně. Model reprezentuje zmenšenou repliku studentského automobilu Studentcar SCX v měřítku 1:10. [1]

2.1 Podvozek

Jako základ platformy slouží podvozek Tamiya TT-01E pro silniční RC modely. Jedná se o plastovou konstrukci s malou světlou výškou a nízko položeným těžištěm. Veškerá elektronika a pohonná jednotka je montována na tak zvanou vanu spojující přední a zadní nápravu. Tuhost celku je zajištěna výše umístěným podélným nosníkem a jako celek tvoří hlavní nosnou konstrukci podvozku. V případě zájmu lze model opatřit také množstvím hliníkových součástí.



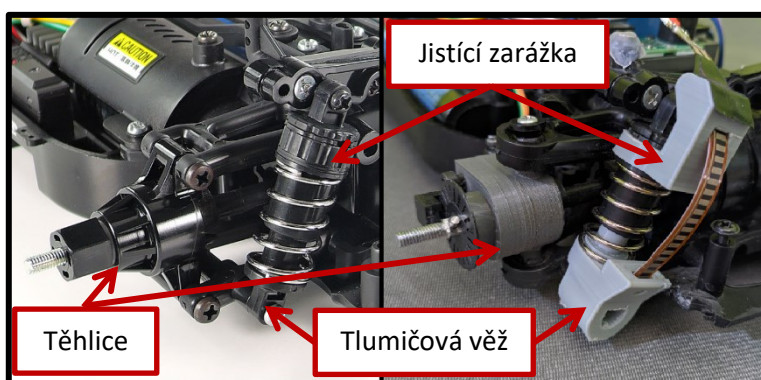
Obrázek 1 Popis sériového podvozku RC modelu TT-01E (převzato a upraveno z [3]).

Podvozek je vybaven stálým pohonem všech čtyř kol. Elektromotor přenáší výkon pomocí pastorku s přímým ozubením na hnací ozubené kolo. To rozvádí výkon přímým spojením na zadní převodovku a pomocí kardanové tyče na převodovku přední. Obě převodovky jsou osazeny planetovými diferenciály a dále nesou výkon na poloosy nábojem spojené s koly modelu. Rozvor kol je 257 mm při celkové délce 375 mm. Celková hmotnost použitého RC modelu činí 2,191 kg. [1], [3]

2.1.1 Zavěšení a uložení kol

Model je vybaven nezávislým zavěšením kol, každé rameno se může pohybovat nezávisle na ostatních. Ve výchozí poloze jsou ramena udržována pomocí třecích tlumičů s pružinami. Použitím jiných pružin jsme tak schopni změnit světlou výšku a přilnavost automobilu. Jak světlá výška, tak tuhost odpružení ovlivňují jízdní vlastnosti modelu. [3]

Propojení zavěšení s koly je realizováno pomocí tak zvaných těhlic, ve kterých je uložena osa s nábojem kola. Náboj spojuje kolo s kardanem pomocí zajišťovacího kolíku. Je v těhlici uložen pomocí dvou ložisek. Spojení těhlic s rameny zajišťují šroubové čepy. Měření otáček je realizováno pomocí světelné závory umístěné na těhlici každého kola. Pro tento účel je osy dále nasunut disk s čárkami pro detekci polohy kol. Pro nedostatek prostoru jsou původní těhlice všech kol nahrazeny neoriginálními díly vytvořenými pomocí metody 3D tisku. Na obrázku 2 vidíme pro porovnání kompletní sériové a upravené zavěšení levého zadního kola. Původní návrh obou dílů bohužel praskl při jízdě. Dle mého názoru z důvodu trochu nevhodného návrhu uchycení zatáčecího mechanismu, a hlavně velmi nízkého vyplnění při 3D tisku (z pohledu odhadem 15 – 20 %). Proto jsem navrhl díly nové a pevnější, vytisknuté na mé domácí 3D tiskárně Ender 3 z materiálu PLA. Těhlice s vyplněním 100 %, uložení tlumičů a jistící záložky s vyplněním 50 %. [1]



Obrázek 2 Originální těhlice (vlevo) a neoriginální těhlice a zavěšení (vpravo), (převzato a upraveno z 1 3).

2.1.2 Karoserie a kola

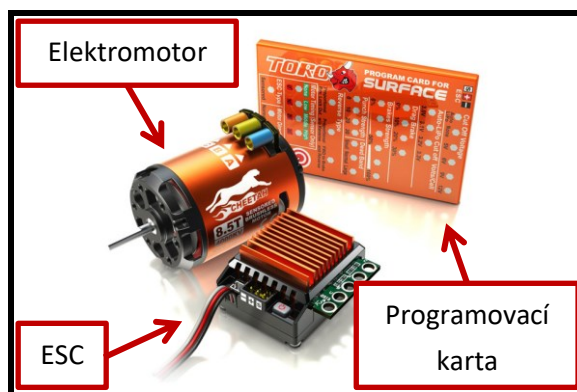
Sériové karoserie RC automobilů se vyrábějí z polykarbonátu. Karoserie i kola použitého RC modelu jsou vyrobeny na míru pomocí 3D tisku podle předlohy Studentcar SCX. U RC modelů není karoserie nosným prvkem, není proto vyžadována vysoká tuhost. Kastle je tvořena dvěma díly lepenými dohromady. Stejně jako v případě těhlic a uložení tlumičů, původní návrh kol selhal. Jednak z důvodu nevhodného návrhu spoje mezi hlavní otáčející částí a paprsků kola. Stejně tak bylo na vině opět velmi nízké vyplnění dílů. Kola a těhlice jsou obecně velmi namáhané části a dvojnásob to platí pro kola přední, kde se nachází také zatáčecí mechanismus. Díly musí vydržet vysoké hodnoty točivých momentů a radiálních sil. Proto jsem navrhnul kola nová, vycházející z původních kol dodávaných s podvozkem, o vyplnění 100 %. [1]



Obrázek 3 Karoserie RC modelu.

2.2 Pohonná jednotka

Automobil je elektrický, tudíž k uvedení do pohybu používá elektromotor. V modelu je nainstalován kompletní set pohybové jednotky Cheetah 1:10 60A 4000kv 8.5T od společnosti SKYRC. Jedná se o dvoupólový bezkartáčový stejnosměrný motor (BLDC) se snímáním polohy kotvy pro hladší průběh otáček, zejména při rozjezdech. Motor má výkon až 400 W při maximálním odběru 60 A. Celé RC Combo můžeme vidět na obrázku 4. [5]



Obrázek 4 Set elektroniky Cheetah 1:10 60A 4000kv 8.5T (převzato a upraveno z [5]).

Jako řídicí jednotka se k těmto modelářským motorům používá tak zvaný elektronický regulátor otáček, zkráceně ESC. Je to zařízení řídící spínání pólových dvojic elektromotoru a dle požadované rychlosti určuje velikost napájecího napětí motoru. Dle velikosti napětí se odvíjí otáčky elektromotoru. Použitý regulátor je programovatelný pomocí programovací karty pro změnu parametrů jízdy. Pro napájení serva a přijímače je osazen integrovaným stabilizátorem napětí (BEC) o výkonu 6V / 3A. [5]

Pro napájení elektroniky je použita baterie typu NiMH od společnosti LRP Electronic. Akumulátor se skládá z šesti samostatných článků o napětí $U_{\text{CL}} = 1,2 \text{ V}$ zapojených do série. Celkové napětí činí $U_{\text{BAT}} = 7,2 \text{ V}$ s konečnou kapacitou 3000 mAh (vzhledem k zapojení musí mít každý článek 3000 mAh). Pro napájení se ovšem tato baterie vyjevila jako nízko výkonná, není schopna dodat dostatečný vybíjecí proud. Pro testování jsem tedy nakonec použil svou dvoučládkovou (2S) Lithium-Polymerovou baterii Turnigy s kapacitou 5200 mAh a napětím $U_{\text{BAT}} = 7,4 \text{ V}$. Její zátěžný proud činí až 30C, tedy $I_V = 156 \text{ A}$.



Obrázek 5 LRP POWER PACK NiMH 7,2 V 3000 mAh (převzato a upraveno z [6]),

Maximální otáčky elektromotoru jsou určeny počtem závitů satorového vinutí, tedy počtem otáček na volt. Udává je tedy napájecí napětí baterie:

$$n_{\text{max}} = n_{\text{kv}} \cdot U_{\text{BAT}} \text{ (ot/min)} \quad (2.1)$$

V mém případě $n_{kv} = 4000$ a při plně nabitě baterii $U_{BAT} = 7,2$ V odpovídají maximální otáčky:

$$n_{max} = 4000 \cdot 7,2 = 28\,800 \text{ ot/min} \quad (2.2)$$

2.3 Servomotor a dálkové ovládání

Řízení modelu zajišťuje servomotor HS-5485HB od společnosti Hitec. Jedná se o digitální servomotor řízený pomocí PWM signálu generovaného přijímačem RC soupravy. Rychlost otáčení a síla serva se odvíjí od velikosti napájecího napětí. V našem případě činí velikost napájecího napětí z regulátoru otáček 6 V. Proto má servo tah až 6,4 kg/cm. Celkový rozsah otáčení je 60° při rychlosti 0,17 s/60°. Ve skutečnosti jsem se pro testování rozhodl použít své vlastní servo s tahem až 10,2 kg/cm, jelikož všechny provedené úpravy podvozku se negativně projeví na zatáčení modelu. [7]



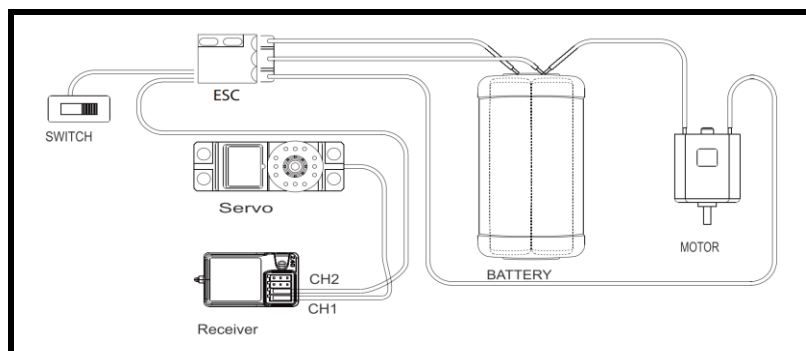
Obrázek 6 Servomotor HS-5485GB (převzato a upraveno z 7).

K ovládání modelu je použita digitální RC souprava od firmy Absima. Skládá se z vysílacího prvku (rádia) Absima CR2S.V2 a přijímacího prvku Absima R3FS. Vysílač má dva kanály a je vybaven obousměrnou plastovou spouští pro ovládání plynu. K ovládání směru jízdy slouží miniatura volantu s plynulým nastavením úhlu natočení kol. Oba prvky pracují na frekvenci 2,4 GHz, podobně jako WiFi síť, ovšem s modulací typu AFHDS. Vysílač je zapotřebí s přijímačem tak zvané spárovat, aby pracovali na stejném kanále. [8]



Obrázek 7 Dvoukanálová RC souprava Absima CR2S.V2 (převzato a upraveno z [8]).

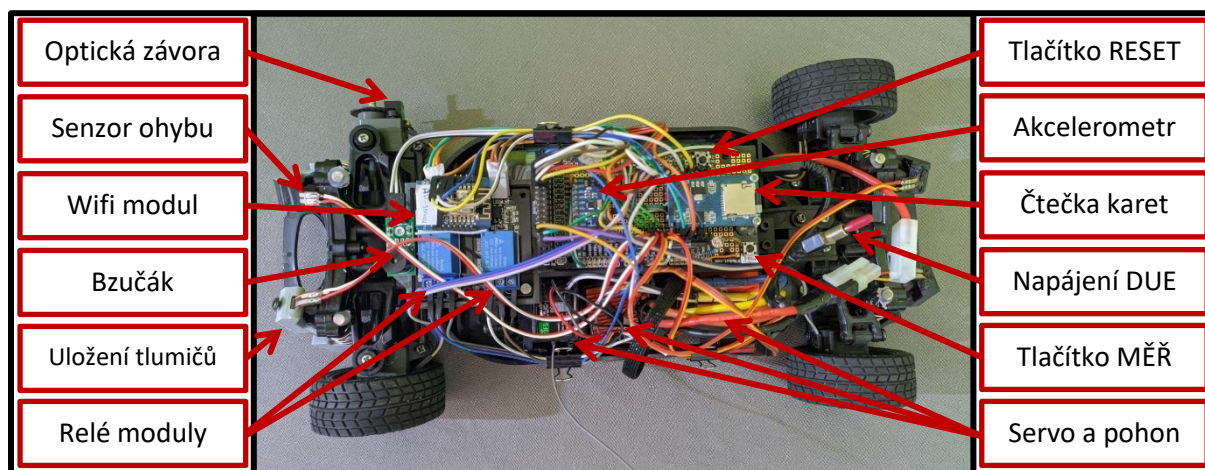
Přijímač je tříkanálový. Na obrázku 8 vidíme doporučené zapojení elektroniky RC modelu, dle manuálu RC soupravy. Vidíme, že kanál 1 (CH1) slouží k řízení servomotoru. Kanál 2 (CH2) posílá informace do ESC a je určen pro ovládání otáček elektromotoru.



Obrázek 8 Doporučené zapojení RC soupravy Absima (převzato a upraveno z [8]).

2.4 Snímače a měřicí jednotka

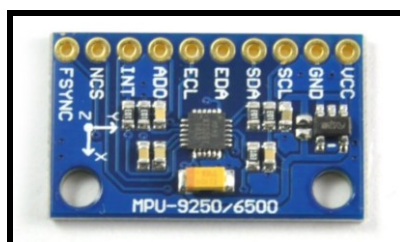
Podvozek je osazen senzory, pomocí kterých jsme schopni měřit rychlost, zrychlení, přetížení, zdvih tlumičů, a rychlost otáček jednotlivých kol. Měření a zpracování dat má na starosti vývojová deska Arduino DUE, která je umístěna v krabici na nosníku pod karoserií. Data ukládá na SD kartu a je tedy možné je jednoduše přenést do počítače. Na obrázku 9 vidíme podvozek po konečných úpravách.



Obrázek 9 Podvozek s namontovanými senzory.

2.4.1 Modul akcelerometru, gyroskopu a magnetometru

Jak už název napovídá, akcelerometr je elektromechanické zařízení sloužící k měření zrychlení sil. Měřené síly mohou být statické (tíhová síla) a dynamické. V případě statických sil měříme například úhel natočení vůči povrchu Země. Na druhou stranu u dynamických sil, které jsou způsobeny pohybem akcelerometru, zjišťujeme směr pohybu objektu. Základní dělení akcelerometrů je na analogové (napěťové úrovně odpovídají danému přetížení) a digitální (PWM). Mezi nejrozšířenější patří akcelerometry pracující na základě změny kapacity nebo principu piezoelektrického jevu. [9]



Obrázek 10 Modul akcelerometru MPU-9250/6500 (převzato a upraveno z [10]).

V této aplikaci je použit modul MPU-9250/6500, který v sobě kromě akcelerometru integruje také magnetometr a gyroskop (až 16 G). Všechny tři senzory pracují se třemi osami (x, y, z) a rotacemi okolo nich. Celkově jsou tak schopny snímat až devět stupňů volnosti. Pro napájení se používá napětí o rozsahu $U_{VCC} = \{3 \sim 5\}$ V. Komunikace s řídicí deskou probíhá pomocí sériové sběrnice SPI. [10]

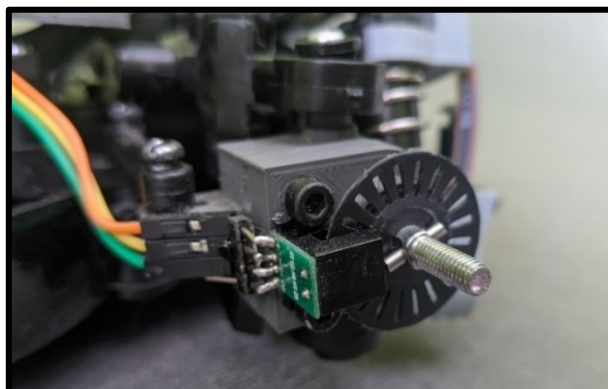
Tabulka 1 Parametry senzorů v modulu MPU-9250.

Gyroskop		Akcelerometr		Magnetometr	
Rozsah	Frekvence	Rozsah	Frekvence	Rozsah	Frekvence
°/s	Hz	G	Hz	uT	Hz
±250, ±500, ±1000, ±2500	8000	±2, ±4, ±8, ±16	4000	±4800	8

Jednotlivé senzory disponují samostatnými AD převodníky, takže není potřeba dalšího přepočtu. Do arduina je tedy přiváděna digitální podoba o zvoleném rozsahu. Nemusíme tedy plýtvat prostředky mikrokontroléru k převodu. Maximální rozlišení činí ve všech případech 16 bitů a frekvence přenosu dat je programovatelná. V práci jsou ve všech případech použity nejnižší možné rozsahy s rozlišením převodníků 12 bitů. Modul disponuje také funkcí přerušení, která může sloužit k probouzení procesoru pro začátek měření, stejně tak i pro zpětné usnutí.

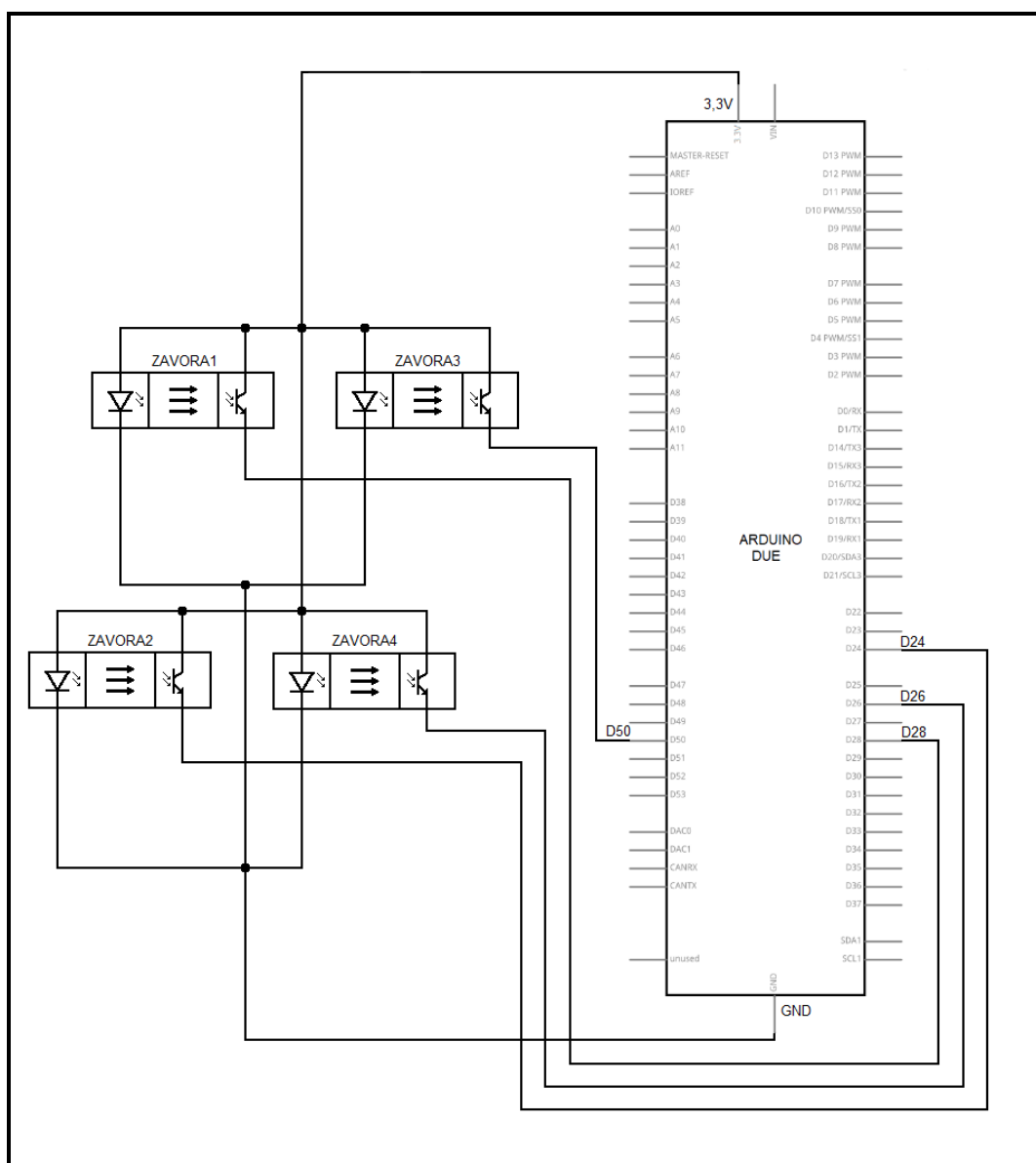
2.4.2 Světelné závory

Na obrázku 11 vidíme umístění snímače pro měření otáček, který je uchycen na těhlici pomocí šroubu. Zakládá se na otáčivém optickém disku s pravidelně se střídajícími průhlednými a neprůhlednými plochami, který vsunut na osu kola. Při otáčení disku dochází k opětvnému přerušování světla vyzařujícího z diody LED, které je zachytáváno pomocí fototranzistoru. Obdobným způsobem je modifikováno každé kolo automobilu. V případě předních kol nedochází k problému, osa kola se při zatáčení otáčí společně s těhlicí. [1]



Obrázek 11 Světelná závora s diskem osazeným na osu kola.

Měřené otáčky se určují na základě pulzů za určitý čas. Vychází se z předpokladu, že disk určuje, kolik pulzů odpovídá jednomu otočení. Závora využívá celkem 3PINy, jejich přehled vidíme v tabulce 2. Signálový výstup ze závory je připojen na digitální vstup arduina a přenáší okamžitou hodnotu počtu pulzů. Mikrokontrolér při měření určuje rozdíl času mezi jednotlivými pulzy.



Obrázek 12 Zapojení optických závor k digitálním vstupům.

Tabulka 2 Parametry použitých optických závor.

I/O			Ucc	Pulzů/otáčku
Ucc	GND	PULSE	3,3V	20

Tato hodnota je následně přepočtena na počet pulzů za jednu minutu:

$$PZM = pulzy \cdot \frac{1000}{t_{pulzu}} \cdot 60 \text{ (pulzů/min)} \quad (2.3)$$

A konečně na otáčky za minutu:

$$n = \frac{PZM}{\text{pulzy na otáčku}} \text{ (ot/min)} \quad (2.4)$$

Měření je zajištěno pomocí systému externího přerušení s rozlišením 12 bitů. To zajišťuje detekci vzestupné nebo sestupné hrany pulzu, tedy změnu stavu na digitálním vstupu. V programu modelu jsou detekovány vzestupné hrany (rising) a časový rozdíl mezi nimi vlastně představuje dobu pulzu. Zapojení v RC automobilu k arduinu vidíme na obrázku 12.

Pokud budeme uvažovat plně nabitou baterii, bude mít motor otáčky:

$$n = (\text{otáčky na V}) \cdot U_{\text{BAT}} = 4000 \cdot 7,2 = 28800 \text{ ot/min} \quad (2.5)$$

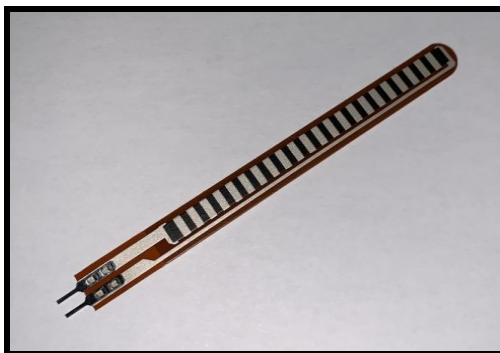
Jak bylo zmíněno, disk má 20 pulzů na otáčku, proto je počet pulzů za sekundu roven:

$$PZS = \frac{n}{60} \cdot (\text{pulzy na otáčku}) = \frac{28800}{60} \cdot 20 = 9600 \text{ pulzů/s} \quad (2.6)$$

Hodnota PZS vlastně odpovídá počtu náběžných hran přivedených na vstup přerušení mikrokontroléru. Je to poměrně vysoká hodnota. Musíme navíc uvažovat, že optické brány jsou na arduino připojeny 4 a zpracovává se i další měření. Ve skutečnosti je maximální frekvence pulzů přivedená na vstup přerušení závislá na počtu cyklů, které je mikrokontrolér schopen za sekundu vykonat. Různé instrukce navíc mohou zabrat k vykonání i více než jeden strojový cyklus. V praxi to tedy znamená, že čím delší je kód zajišťující měření, tím více je potřeba strojových cyklů a maximální snímaná frekvence klesá. V momentálním stavu se tedy nedá přesně určit, s jakou frekvencí je možné snímat otáčky, protože neznáme konečnou délku programu.

2.4.3 Ohybové senzory

Aby bylo možné měřit zdvih tlumičů, je vymyšlen systém uchycení odporových senzorů ohybu na jednotlivé tlumiče. Fungují na principu deformace (ohybu) generujícího změnu odporu, který je poté pomocí arduina převedeno do digitální podoby a přepočteno na milimetry. Ve výchozím stavu jsou snímače mírně prohnuté, proto musí být kalibrovány na nulovou polohu při průhybu. [1]

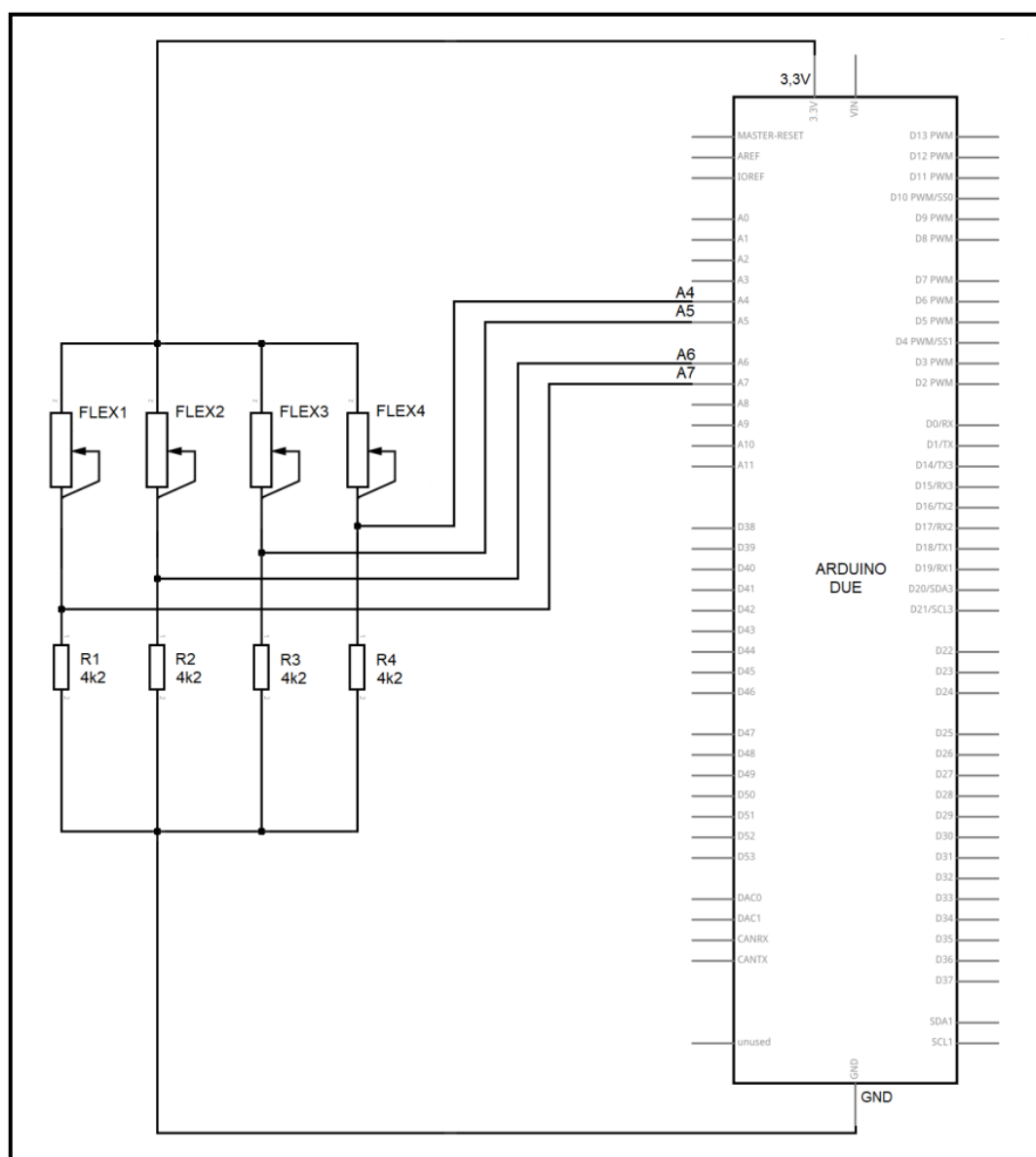


Obrázek 13 Flex Senzor 2,2" pro měření zdvihu tlumičů (převzato a upraveno [1]).

Tabulka 3 Parametry použitých Flex Senzorů.

Odpor v rovném stavu	Odpor při ohybu 180°	Typická spotřeba	Teplotní rozsah
R_{FLAT}	R_{180°	P	t
k Ω	k Ω	W	°C
25	110	0,5	-35 – 80

Výstupem Flex Senzoru je proměnná hodnota odporu v závislosti na úhlu ohybu. Odpor samozřejmě arduino není schopno přímo měřit. Z toho důvodu se využívá zapojení Flex Senzoru na analogový vstup vůči napájecímu napětí, zde 3.3 V. Aby byla logická úroveň správně definována, je k analogovému vstupu připojen také pull-up rezistor o velikosti $R = 4,2 \text{ k}\Omega$. Tím vznikne napěťový dělič, jehož výstupem je napětí přivedené na analogový vstup mikrokontroléru.

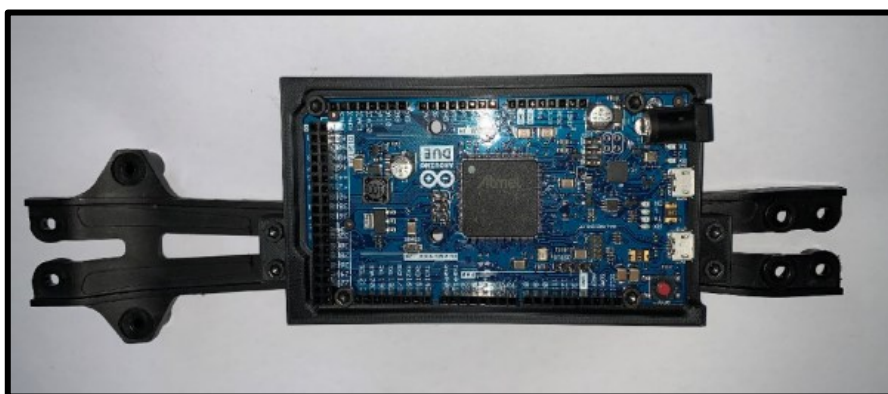


Obrázek 14 Zapojení flex senzorů k analogovým vstupům.

Zapojení použité na modelu vidíme na obrázku 14. Rozdílem je použití pull-up rezistoru o hodnotě $R = 4,2 \text{ k}\Omega$. Na analogový vstup nesmí být připojeno napětí vyšší než 3.3 V, při použití děliče tomu za-
mezíme. Napětí je pomocí AD převodníku převáděno a následně v programu přepočítáno na zdvih tlu-
mičů. Bohužel, rezistivita flex senzoru mi není známa a nejsem schopen ji změřit. Můj multimetr má ma-
ximální odpor na svorkách roven $20 \text{ k}\Omega$, proto předpokládám, že odpor senzoru je násobně vyšší.

2.4.4 Měřicí jednotka

Základ měřicího systému tvoří vývojová deska Arduino DUE. Na desce je umístěn 32-bitový procesor SAM3X8E ARM Cortex M3 pracující na taktovací frekvenci 84 MHz. Obsahuje celkem 54 I/O pinů a umožňuje realizaci poměrně rozsáhlých projektů. Díky bohatým knihovnám arduino a kompatibilitě s většinou doplňkových modulů Arduino Shield, je zachována jednoduchost běžných arduino systémů.



Obrázek 15 Řídicí deska usazená na nosník (převzato a upraveno [1]).

Základní technické specifikace:

- Paměť 512 KB flash a 96 KB SRAM.
- Procesor SAM3X8E založený na architektuře ARM s jádrem Cortex M3
- Taktovací frekvence: 84 MHz,
- Sběrnice: SPI, UART,, CAN, TWI, JTAG, microUSB, microUSB Host,
- Programování skrze microUSB port, není potřeba programátor,
- Maximální rychlost přenosu dat 230400 baud, spolehlivost zaručena do 115200 baud,
- Doporučené vstupní napětí: 7-12 V,
- Celkem 54 I/O pinů, každý s $100 \text{ k}\Omega$ pull-up rezistorem,
- Maximální frekvence PWM: 1000 Hz,
- Maximální vstupní napětí I/O pinů: 3,3 V,
- Maximální proud odebíraný všemi I/O piny: 130 mA,
- Pro externí přerušení je možné využít libovolný pin,

Tabulka 4 *Přehled vstupů a výstupů Arduina DUE a jejich vlastností.*

Typ I/O		Počet	Rozlišení	Max. proud	Max proud celkem	Max. napětí
		-	bit	mA	mA	V
Digitální		54	1	15	130	3,3
PWM		12	8			
Analogový	ADC	12	12	3		
	DAC	2				
UART	TX	4	9			
	RX	4				

Shrnutí

V této kapitole je popsána konstrukce podvozku RC modelu. Dále se kapitola zabývá řídicí deskou Arduino DUE, popisem senzoriky a jejich propojením. Parametry senzorů byly přehledně uvedeny v tabulkách a vykresleny schémata zapojení.

3 Princip vzdáleného ovládání

V rámci dálkového ovládání RC modelu hovoříme o tak zvané bezdrátové komunikaci. V principu je tedy přenos příkazů (rychlost, směr) realizován jiným způsobem než pomocí kabelového vedení. To s sebou přináší výhody, ale i nevýhody. Jednoznačnou a naprosto převládající výhodou je možnost ovládat RC model z jednoho stanoviště bez omezení. Fyzický kabel je omezen dosahem a také se motá do překážek. To v případě bezdrátové technologie nehrozí. Na druhou stranu může dojít k výpadkům signálu způsobených okolním rušením nebo křížením kanálů. Těmto výpadkům jsme však schopni z velké části předejít výběrem vhodného místa k provozu.

V zásadě existují tři typy bezdrátového přenosu dat: [11]

1. sonický – pomocí zvuku,
2. optický – pomocí světla,
3. rádiový – pomocí rádiových vln.

Všechny zmíněné způsoby ke komunikaci využívají vlnění signálu. Sonické signály se přenášejí pomocí vlnění mechanického. Naopak signály optické a rádiové využívají k šíření elektromagnetického pole vlny elektromagnetické. Pro ovládání RC modelů se v naprosté většině případů vyskytuje princip přenosu signálu pomocí rádiových vln, tedy určitého spektra elektromagnetického záření. [11]

3.1 Rádiové vlny

Rádiovými vlnami nazýváme elektromagnetické vlnění v kmitočtovém pásmu 10 kHz až 300 GHz, které se šíří volným prostorem. Rádiové vlny se používají především k přenosu dat prostřednictvím modulační. Rozlišujeme dva základní druhy modulační: [12]

1. frekvenční modulační (FM) – v určitém rozsahu frekvencí se mění kmitočet nosné vlny podle nízkofrekvenčního signálu,
2. amplitudová modulační (AM) – podle přenášeného nízkofrekvenčního signálu se mění amplituda nosné vlny.

Vlnová délka rádiových vln se pohybuje v rozmezí od několika milimetrů do řádově stovek až tisíců kilometrů. Jsou vyzařovány anténami, jejichž délka je úměrná délce nosné vlny. Samostatným spektrem rádiových vln jsou mikrovlny. Jedná se o elektromagnetické vlnění o super vysoké a extrémně vysoké frekvenci s vlnovou délkou 1 mm až 1 m. Jak vidíme v tabulce 5, jejich vlnová délka je podstatně menší než vlnová délka běžných rádiových vln používaných pro komunikační účely. [12] [14]

Stejně jako v případě IR záření se rádiové vlnění dělí podle frekvence a vlnové délky do několika pásem. Přehled všech pásem rozdělený dle radiokomunikačního řádu Ženeva 1990 je uveden v tabulce 5. [14]

Tabulka 5 Dělení rádiového záření dle pásem (převzato a upraveno z [14]).

Pásmo			f	λ
ELF	Extremely Low Frequency	Extrémně dlouhé vlny	3 mHz ÷ 3kHz	1000 ÷ 100 km
VLF	Very Low Frequency	Velmi dlouhé vlny	3 ÷ 30 kHz	100 ÷ 10 km
LF	Low Frequency	Dlouhé vlny	30 ÷ 300 kHz	10 ÷ 1 km
MF	Medium Frequency	Střední vlny	0,3 ÷ 3 MHz	1 ÷ 0,1 km
HF	High Frequency	Krátké vlny	3 ÷ 30 MHz	100 ÷ 10 m
VHF	Very High Frequency	Velmi krátké vlny	30 ÷ 300 MHz	10 ÷ 1 m
UHF	Ultra High Frequency	Ultra krátké vlny	0,3 ÷ 3 GHz	100 ÷ 10 cm
SHF	Super High Frequency	Mikrovlny	3 ÷ 30 GHz	10 ÷ 1 cm
EHF	Extremely High Frequency		30 ÷ 300 GHz	10 ÷ 1 mm

3.2 Ovládání RC modelů

Většina vysílačů pracuje na protokolech o frekvencích 2,4 GHz. Pásmo 2,4 GHz bylo do dálkového ovládání RC automobilů zavedeno značkou Spektrum. Nahradila technologii do té doby krystalových souprav pracujících na frekvencích 36, 40 a 27 MHz, které se propojují pomocí kanálu, daným frekvencí krystalů – jak ve vysílači, tak v přijímači musí být krystaly totožných parametrů. Hlavní důvodem bylo umožnit uživatelům, aby na svých RC modelech provozovali více dostupných frekvencí pro ovládání více modelů jedním vysílačem. Všechny tyto frekvence jsou v podobě kmitočtových pásem vyhrazeny pro ovládání rádiových modelů dle Českého telekomunikačního úřadu.

3.2.1 Modulace pomocí rozprostřeného spektra

Vysílače s frekvencí 2,4 GHz nabízejí vyšší spolehlivost. Kratší vlnová délka na druhou stranu přináší menší výkon signálu a s tím související menší dosah. To je obecně vyřešeno pomocí vysoce výkonného RF výstupu, který je zabudován přímo do vysílače. Starší soupravy s delší vlnovou délkou, jsou v dnešní době zahlceny přeplněním šířky. To vede k problémům s rušením signálu a omezování počtu uživatelů na jednom místě.

Výrobci si postupem času vyvinuli své vlastní komunikační protokoly, které zajišťují sdílení informací mezi vysílačem a přijímačem. I když v zásadě používají stejné principy, protokoly různých výrobců mezi

sebou nejsou kompatibilní. RC souprava využitá v této práci používá protokol AFHDS (Automatic Frequency Hopping Digital System) vyvinutý společností Flysky. Informace o tomto protokolu prakticky neexistují, ale vše nasvědčuje tomu, že se jedná o modifikaci protokolu FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum).

Metody rozprostřeného spektra zajišťují odolnost proti rušení. Principem pro komunikaci je záměrné využívání širšího frekvenčního pásma, než je pro komunikaci nezbytně nutné. Díky tomu se signál rozprostře do širokého pásma. Pro kontrolu přenesených dat mezi vysílačem a přijímačem je zaveden CRC kód (Cyclic Redundancy Code), pomocí něhož se kontroluje soudržnost dat. CRC kód nebude souhlasit, pokud alespoň jeden přijatý bit nesouhlasí s odeslaným. Klasické RC přijímače vadné pakety ignorují, modernější Wi-Fi přijímače vyžadují opětovné poslání paketu.

FHSS

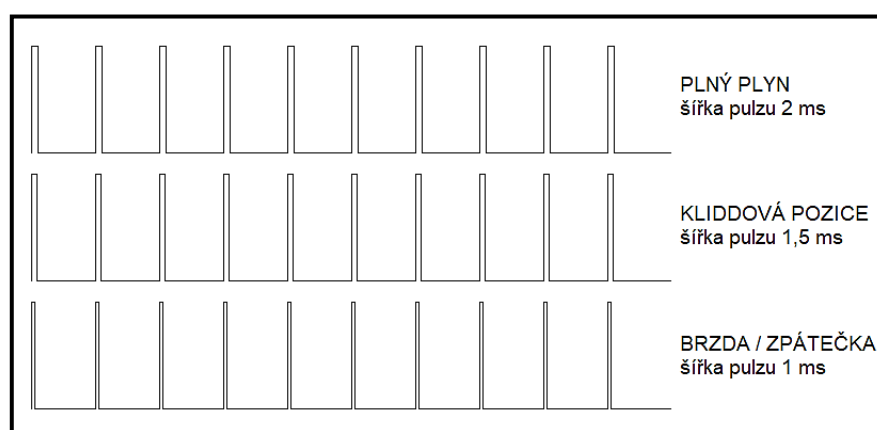
Frequency Hopping Spread Spectrum, znamená přeskakování kmitočtů v rozprostřeném spektru. Principem této techniky je přeskakování nosného signálu s namodulovanými daty mezi různými frekvencemi. K těmto přeskokům dochází v krátkých časových intervalech (maximálně 400 ms). Vysílač i přijímač znají sekvenci těchto přeskoků a vždy se tedy včas přeladí na správný podkanál. Tato technika nevylučuje, že v některém okamžiku dojde k souběhu dvou signálů na stejném podkanálu, to znamená, že dojde k rušení.

DSSS

Direct Sequence Spread Spectrum, znamená přímé rozprostření signálu do spektra. V principu této techniky se předpokládá, že každý přenášený bit je nahrazen sekvencí bitů, pomocí tak zvaného Barkerova kódu. Tato sekvence se nazývá chip. Dochází tak k redundanci bitů, tedy k rozprostření signálu do větší části frekvenčního spektra. Výsledkem je signál, který je méně citlivý na rušení.

3.2.2 Ovládání motoru

Přijímač je s vysílačem propojen stejným kanálem a zjednodušeně zachytává povely k pohybu. Ty zpracuje a dle požadavku je převede na servosignál, což je ve skutečnosti PWM signál s frekvencí 50 Hz. V praxi to znamená, že pokud chceme k ovládání otáčení motoru použít jiný systém, musíme do ESC poslat signál stejného charakteru. Takový signál můžeme vidět na obrázku 16.



Obrázek 16 PWM signál generovaný přijímačem pro ovládání otáček motoru.

V zásadě existují dvě možnosti řešení určení délky pulzu. Prvním je použití časovačů arduina. Ty nabízejí vysoké rozlišení, ale samotné programové řešení je poměrně složité. Zdrojový signál generovaný přijímačem je navíc v reálných podmínkách více zkreslený, takže zvýšená přesnost přichází vniveč. Druhou možností je použití přerušení, stejně jako v případě měření otáček kol. Principiálně jsou stejné – vstup reaguje na změnu stavu vstupní veličiny. Ta je poté rozdílem přepočtena na časovou hodnotu délky pulzu. Třetí a nejjednodušší možností pro řízení, také použitou v této práci, je použití PWM výstupů arduina. Jedná se o nejjednodušší systém, jelikož knihovna „*servo.h*“ v Arduino IDE je knihovna přímo určena pro řízení servomotorů a ESC, která generuje servosignál o uživatelem zvolené frekvenci.

Shrnutí

V této kapitole je proveden popis ovládání RC modelů z hlediska signálových veličin. RC soupravy spolu komunikují pomocí různých metod zahrnutých v tak zvaných komunikačních protokolech. V praxi nás použitý protokol moc trápit nemusí, ovlivnit jej stejně můžeme pouze nákupem jiné vysílačky. Ve výsledku nám stejně záleží pouze na komunikaci jako takové a její spolehlivosti. V kapitole je také popsán princip ovládání motorů z hlediska PWM signálu generovaného přijímačem, ale také možnosti ovládání pomocí servosignálu arduina.

4 Hodnocení dynamiky jízdy

Jízdní dynamika a jízdní stavy jsou charakterizovány základními vztahy pro pohyb hmotného tělesa. Pro výpočty se těleso, v našem případě automobil, nahrazuje hmotným bodem umístěným do těžiště tělesa. Pro reálné modely musíme zahrnout také odpory proti pohybu. Obecně je možné měření jízdní dynamiky provádět na jakémkoliv povrchu – jak na rovném a nerovném terénu, tak i na nakloněné rovině. [16]

4.1 Základní měřené veličiny

Parametry dynamiky jízdy se určují pomocí základních kinematických a dynamických veličin. Pro hodnocení dynamiky jízdy automobilu je především důležité jeho zrychlení, hmotnost, výkon použité pohonné jednotky a síly působící proti žádanému pohybu.

4.1.1 Čas a dráha

Základními fyzikálními veličinami jsou dráha a čas. Bez času bychom nebyli schopni vypočítat rychlost ani zrychlení automobilu. Pro měření dynamiky vozidla je důležitý čas, který představuje rozdíl mezi dvěma časovými okamžiky během testovacího manévru. [16]

$$\Delta t = t_2 - t_1 \text{ (s)} \quad (4.1)$$

kde: Δt – změna času (s), t_2 – čas na konci testovacího manévru (s), t_1 – čas na začátku testovacího manévru (s).

Pro hodnocení dynamiky vozu je důležitá také dráha. Fyzikálně dráha označuje délku trajektorie, kterou těleso nebo hmotný bod nebo těleso urazí za určitý čas. Dráha automobilu představuje vzdálenost, kterou vozidlo ujede mezi dvěma časovými okamžiky během testovacího manévru. V zásadě může být dráha popsána jakýmkoliv pohybem. V případě automobilů ovšem uvažujeme primárně přímočaré nebo křivočaré pohyby. Z hlediska pohybu, křivočarý pohyb představuje například tak zvaný losí test, u kterého ovšem dráhu nevyhodnocujeme. [16]

$$\Delta s = s_2(t_2) - s_1(t_1) \text{ (m)} \quad (4.2)$$

kde: Δs – změna dráhy (m), s_2 – dráha v časovém okamžiku t_2 (m), s_1 – dráha v časovém okamžiku t_1 (m).

4.1.2 Rychlost

Rychlost automobilu vychází z předchozích měřených veličin. Obecně je rychlost definována jako změna polohy hmotného bodu nebo tělesa za určitý čas. Uvažujeme okamžitou a průměrnou rychlost. Okamžitá nebo také aktuální rychlost je rychlost v daném, nekonečně krátkém, časovém okamžiku. Okamžitou rychlost vozidla tedy můžeme vypočítat jako derivaci dráhy podle času. Pro upřesnění se jedná o rychlost, kterou vidíme na tachometru při jízdě automobilem. Můžeme říci, že okamžitou rychlost vždy měříme. [16]

$$v = \frac{ds}{dt} \text{ (m/s)} \quad (4.3)$$

kde: v – okamžitá rychlost (m/s).

V případě průměrné rychlosti vycházíme z předpokladu, že se jedná o celkovou dráhu ujetou mezi dvěma časovými okamžiky za určitý časový úsek. Přeneseně tedy průměrná rychlost představuje změnu dráhy mezi dvěma časovými okamžiky za čas potřebný k ujetí této dráhy. Můžeme říci, že průměrnou rychlost vždy získáme výpočtem. [16]

$$v_p = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s_2(t_2) - s_1(t_1)}{t_2 - t_1} \text{ (m/s)} \quad (4.4)$$

kde: v_p – průměrná rychlost (m/s).

4.1.3 Zrychlení

Podobně jako s rychlostí je to se zrychlením. Zrychlení je ovšem definováno jako změna rychlosti za určitý čas. Opět uvažujeme okamžité a průměrné zrychlení. Okamžité nebo také aktuální zrychlení je zrychlení v daném, nekonečně krátkém, časovém okamžiku. Okamžité zrychlení vozidla tedy můžeme vypočítat jako druhou derivaci dráhy podle času nebo jako derivaci rychlosti podle času. [16]

$$a = \frac{d^2s}{dt^2} = \frac{dv}{dt} \text{ (m/s}^2\text{)} \quad (4.5)$$

kde: a – okamžité zrychlení (m/s²).

A stejně tak v případě průměrného zrychlení vycházíme z předpokladu, že se jedná o diferenci rychlosti mezi dvěma časovými okamžiky za určitý časový úsek. Přeneseně tedy průměrné zrychlení představuje změnu rychlosti mezi dvěma časovými okamžiky za čas potřebný k ujetí dané dráhy. Můžeme říci, že průměrné zrychlení vždy získáme výpočtem. [16]

$$a_p = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2(t_2) - v_1(t_1)}{t_2 - t_1} \text{ (m/s}^2\text{)} \quad (4.6)$$

kde: a_p – průměrné zrychlení (m/s²), Δv – změna dráhy (m/s), v_2 – rychlost v časovém okamžiku t_2 (m/s), v_1 – rychlost v časovém okamžiku t_1 (m/s).

4.1.4 Dostředivá síla

Při křivočarých pohybech a pohybech po kružnici dochází k dostředivým účinkům. Dostředivá síla je příčinou dostředivého zrychlení a je kolmá na směr vektoru okamžité rychlosti. Typicky směřuje do středu kružnice, kterou automobil opisuje. [16]

$$F_d = m \cdot a_d = \frac{m \cdot v^2}{r} = m \cdot \omega^2 \cdot r \text{ (N)} \quad (4.7)$$

kde: F_d – dostředivá síla (N), a_d – dostředivé zrychlení (m/s^2), r – poloměr otáčení vozidla (m), ω – úhlová rychlost vozidla (rad/s).

Přičemž z rovnice (4.7) vyplývá, že dostředivé zrychlení je rovno: [16]

$$a_d = \omega^2 \cdot r = v \cdot \omega \text{ (m/s}^2\text{)} \quad (4.8)$$

Úhlovou rychlost při otáčivém pohybu můžeme vypočítat jako: [16]

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \text{ (rad/s)} \quad (4.9)$$

kde: π – Ludolfovo číslo (-), f – frekvence otáčivého pohybu (Hz).

Podle zákona akce a reakce můžeme vyvodit, že reakcí na dostředivou sílu je síla odstředivá. Obě síly mají stejnou velikost, ale opačný účinek: [16]

$$F_d = -F_o \text{ (N)} \quad (4.10)$$

kde: F_o – odstředivá síla (N).

4.1.5 Přetížení

Při akceleraci, brzdění a zatáčení automobilu působí na člověka tak zvané gravitační přetížení. Obvykle se vyjadřuje v násobcích tíhového zrychlení G které působí na těleso. V případě přímočaře pohyblivého se automobilu tedy přetížení závisí na velikosti vektoru zrychlení při akceleraci a deceleraci. Při průjezdu zatáčkou přetížení vychází z velikosti vektoru odstředivého zrychlení. [16]

4.2 Manévry

Po dohodě s vedoucím práce jsme došli k závěru, že manévry budou v této práci zahrnuty dva. První představuje automatizovaný rozjezd a zastavení, druhý automatická simulace losího testu. Oba manévry budou sloužit primárně pro měření těchto jízdních stavů studenty při výuce. Je tedy žádoucí, aby tyto testy byly replikovatelné s co nejnížší odchylkou mezi jednotlivými průjezdy. Pro zjednodušení je zatím uvažováno, že rychlost a natočení kol při manévrech bude zapsáno neměnně v kódu arduina.

Vhodné řešení představuje ovládání zmíněných manévru dálkově pomocí vysílače. Původním záměrem bylo využití zprovozněného, níže zmíněného, třetího kanálu RC soupravy. Takové řešení se ovšem vyvrátilo jako nevyhovující a je nahrazen komunikací separátních wifi modulů. V tomto případě tak počet stisků tlačítka určuje zvolený manévr a autíčko jej následně automaticky provede. Pro takové ovládání jsou použity následující možnosti:

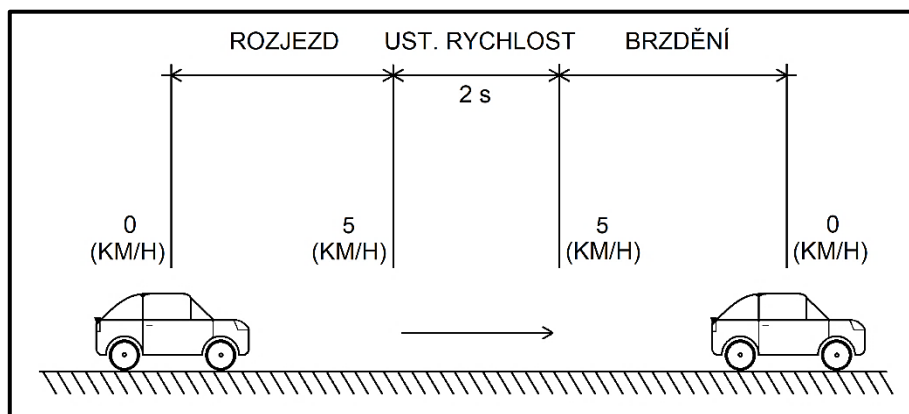
- Tlačítko TEST1 – manévr automatizovaného rozjezdu a brzdění,
- Tlačítko TEST2 – manévr automatického losího testu.

Druhou možnost představuje separátní řešení komunikace s arduinem. V tomto případě by bylo vhodné navrhnout komunikaci na základě komunikačního modulu s mikroprocesorem dodaného do vysílače. Takové řešení má výhodu v možnosti využití i více vstupních tlačítek pro volbu manévru a větší

variabilitu v případě dalších úprav. Nevýhodou je nutnost použití další antény, kdy by mohlo docházet k rušení s ovládáním.

4.2.1 Rozjezd a zastavení

Je uvažován rozjezd z klidu, tedy nulové rychlosti. Pro manévru je vhodné, aby model po rozjezdu dosáhl maximální rychlosti, určitou dobu v ní setrval a konečně došlo k zabrzdění. Při tomto manévru je měřena rychlost, zrychlení a přetížení v přímočarém pohybu.



Obrázek 17 Znárodnění manévru rozjezd a zastavení.

Na základě změřených dat se vyhodnotí celková dráha potřebná k zastavení vozu. RC automobil ne-disponuje mechanickými brzdami, nýbrž k zastavení využívá změnu smyslu otáčivého magnetického pole motoru. Brzdná dráha je závislá na několika parametrech:

- výkon elektromotoru,
- hmotnost automobilu,
- terén a přilnavost k vozovce

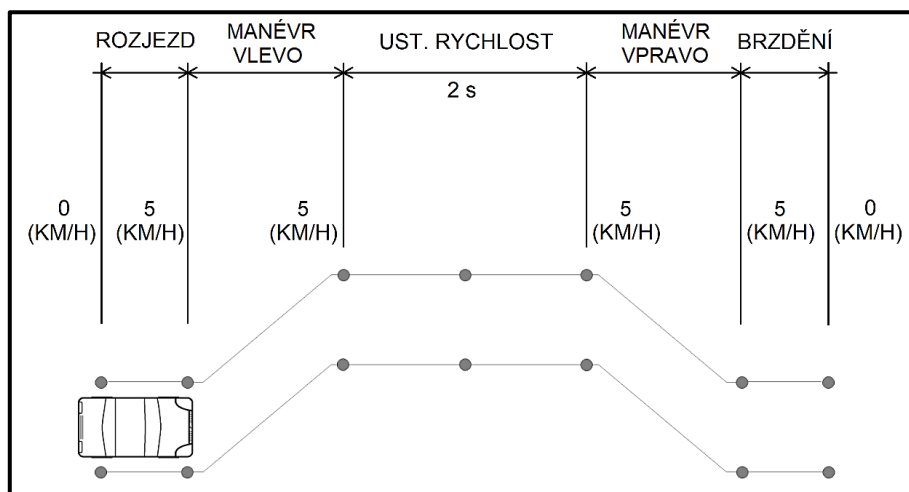
Vzhledem k tomu, že decelerace představuje vlastně akceleraci o opačném smyslu, jedná se o stejnou veličinu s rozdílným znaménkem. To znamená, že brzdná dráha je určena jako podíl zrychlení za určitý čas.

$$s_B = \frac{a}{t} = \frac{\dot{v}}{t} \quad (4.11)$$

4.2.2 Losí test

Při losím testu se testují vlastnosti automobilu při prudkém vyhýbacím manévru. Od toho se odvíjí také název – typicky se uvažuje zabránění srážky se zvěří. Důležitá je přilnavost vozidla, schopnost rychle změnit směr, náklon při zatáčení či přetáčivost kol při odlehčení.

Manévru se provádí při vysokých rychlostech. U osobního automobilu v rozmezí 80 – 100 km/h. Rychlost RC automobilu pro měření tedy není nijak dána, ale pravděpodobně by bylo možné ji interpolovat na menší měřítko. Obecně se začíná od nižší rychlosti, která je zvyšována do chvíle, kdy automobil ztratí přilnavost a přejde do smyku. V práci je rychlost nastavena pomocí pevné hodnoty servosignálu v kódu arduina, což pro studijní účely vyhodnocování výsledků postačí.



Obrázek 18 Znáznornění manévru losího testu.

Při měření nás zajímá rozdíl otáček mezi jednotlivými koly, zdvih tlumičů pro určení odlehčení kola a přetížení při změně směru. Servomotor musí být schopen toto přetížení překonat. Obecně se dá říci, že losí test závisí na podobných parametrech, jako test brzdné dráhy:

- hmotnost automobilu a výška těžiště,
- terén a přilnavost k vozovce,
- rychlost a síla servomotoru.

4.3 Odpory proti pohybu

K uvedení automobilu do pohybu je potřeba na jeho pohybové ústrojí působit určitým výkonem. Tento výkon musí nejen uvést do pohybu celkovou váhu automobilu, ale také překonat síly působící proti pohybu vozidla. Tyto síly nazýváme odpory proti pohybu nebo také jízdní odpor. [4]

Valivý odpor

Valivý odpor je důsledkem deformací samotné pneumatiky a silnice ve stopě pneumatiky. V přední části stopy dochází ke kompresi pneumatiky do pseudo-oválného tvaru. V zadní části se vlivem rozložení měrných tlaků opět vrací do kruhového tvaru. [4]

Valivý odpor je součtem valivých odporů všech kol. Za předpokladu, že je součinitel všech kol stejný, odpovídá: [4]

$$O_f = f \cdot G \cdot \cos(\alpha) \text{ (N)} \quad (4.12)$$

kde: O_f – valivý odpor (N), f – koeficient valivého odporu (-), G – tíhová síla (automobilu) (N), α – úhel naklonění vozovky (°).

Pro jízdu po rovině, kdy $\cos(0^\circ) = 1$, tedy platí: [4]

$$O_f = f \cdot G \text{ (N)} \quad (4.13)$$

Tabulka 6 Součinitel valivého odporu pro různé povrchy (převzato a upraveno z [4]).

Povrch	asfalt	beton	polní cesta		tráva	písek	sníh	bahno	led
			suchá	mokrá					
f	0,01 až 0,02	0,015 až 0,025	0,04 až 0,15	0,08 až 0,20	0,08 až 0,15	0,15 až 0,30	0,20 až 0,30	0,20 až 0,40	0,01 až 0,025

Vzdušný odpor

Odpor způsobený vzduchem je způsobený narážením vzduchu do karoserie. Jeho velikost ovlivňuje tvar karoserie, tření vzduchu vůči karoserii a víry vznikající za automobilem. Dále také vzduch mezi vozovkou a vozidlem, který auto nadnáší. Vzdušný odpor je přímo úměrný nejen čelní ploše karoserie, ale také dynamickému tlaku a součiniteli odporu vzduchu. [4]

Celkový vzdušný odpor vozidla je roven: [4]

$$O_v = c_x \frac{\rho}{2} S_x \cdot v_r^2 \text{ (N)} \quad (4.14)$$

kde: O_v – vzdušný odpor vozidla (N), c_x – součinitel odporu vzduchu (-), ρ – měrná hmotnost vzduchu (kg/m^3), S_x – čelní plocha automobilu (m^2), v_r – výsledná náporová rychlost proudění vzduchu (m/s).

Odpor zrychlení

V případě zrychlování vozidla, například při rozjezdu, působí proti směru vozidla setrvačná síla. Je to síla představující kombinaci dvou složek odporu. Jmenovitě se jedná o odpor zrychlení při posuvu po vozovce a odporu zrychlení točivých částí (například kol, diferenciálů, převodovky a tak podobně). [4]

Odpor zrychlení vyplývá ze vztahu: [4]

$$O_z = O_{zp} + O_{zr} \text{ (N)} \quad (4.15)$$

kde: O_z – celkový odpor zrychlení (N), O_{zp} – posuvná složka odporu zrychlení (N), O_{zr} – rotační složka odporu zrychlení (N).

Přičemž jednotlivé složky odpovídají: [4]

$$O_{zp} = m \cdot a \text{ (N)} \quad (4.16)$$

$$O_{zr} = \sum_i \frac{J_{Ki}}{r_{di} \cdot r_{Ki}} \cdot a \text{ (N)} \quad (4.17)$$

kde: m – celková hmotnost automobilu (kg), a – zrychlení automobilu (m/s^2),
 J_{Ki} – momenty setrvačnosti kol (kg/m^2), r_{Ki} – poloměry kol (m).

4.3.1 Odpor stoupání

Ne vždy vozidlo jede po rovném povrchu. V případě, že se automobil pohybuje po nakloněné rovině, tedy do kopce, musíme vzít v potaz složku tíhy vozidla rovnoběžnou s povrchem vozovky. [4]

Obecně odpor stoupání odpovídá: [4]

$$O_s = \pm G \cdot \sin(\alpha) \text{ (N)} \quad (4.18)$$

kde: O_s – odpor stoupání (N).

V praxi je ovšem pro výpočet výhodnější použít tak zvané stoupání (sklon) svahu: [4]

$$s = \frac{h}{l} = \tan(\alpha) \text{ (-)} \quad (4.19)$$

kde: s – stoupání svahu (-), h - výška svahu (m), l – délka svahu vzdušnou čarou (m).

Odpor stoupání je poté dán vztahem: [4]

$$O_s = \pm G \cdot s \text{ (N)} \quad (4.20)$$

V rovnicích (4.18) a (4.20) si můžeme povšimnout, že odpor stoupání může nabývat jak kladných, tak záporných hodnot. To má jednoduché vysvětlení – automobil může jet jak vzhůru do kopce, tak i z kopce dolů. Kladné hodnoty odporu stoupání odpovídají jízdě do kopce a záporné jízdě ze svahu dolů. [4]

4.3.2 Celkový jízdní odpor

Celkový jízdní odpor je součtem všech dílčích odporů působících na pohyb vozidla. Udává celkovou sílu potřebnou k překonání kombinace všech složek výše uvedených odporů. Při návrhu výkonu pohonné jednotky je nutné ji zahrnout do výpočtu. [4]

$$F_K = O_f + O_v + O_z + O_s \text{ (N)} \quad (4.21)$$

kde: F_K – celkový jízdní odpor (N).

Po dosazení je celkový jízdní odpor roven: [4]

$$F_K = c_x \frac{\rho}{2} S_x \cdot v_r^2 + G \cdot \left(f + s + \vartheta \frac{\ddot{x}}{g} \right) \text{ (N)} \quad (4.22)$$

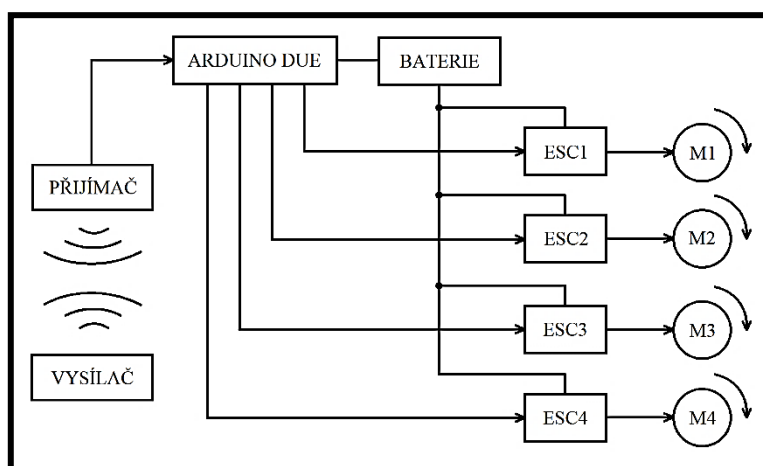
Shrnutí

V této kapitole jsou popsány základní veličiny a možnosti pro hodnocení dynamiky jízdy automobilu. Pro zpracování jsou uvažovány dva jízdní manévry, měření brzdné dráhy a losí test. Oba jsou určitým způsobem implementovány do konečného řešení. V kapitole je také okrajově popsána problematika zapříčiněná jízdními odpory. Ve této práci jsou jízdní odpory působící na automobil vyčíslené a v praxi s nimi musíme počítat, proto je vhodné na ně minimálně upozornit.

5 Možnosti úpravy modelu a řídicí jednotky

V momentálním stavu je model automobilu poháněn jedním elektrickým BLDC motorem. Výkon motoru je na kola přenášěn pomocí převodových jednotek, kardanu a poloos. To ovšem neodpovídá reálné předloze – automobilu Studentcar SCX. V případě „dospělého“ SCX je každé kolo poháněno elektromotorem nezávisle na ostatních. Automobil je tedy vybaven čtyřmi elektromotory, pro každé kolo jeden. Nejsou využity převodovky, cesta výkonu je tak výrazně redukována prakticky jen na přímý přenos pomocí hřídele. V této části se pokusím nastínit prvotní návrh pro úpravu RC modelu pro použití nezávislého pohonu tak, aby co nejvíce odpovídal své předloze.

Vzhledem k navýšení počtu motorů je nutné použít také více řídicích jednotek. Jak je zmíněno výše, řízení elektromotorů RC modelů obstarávají elektronické regulátory otáček (ESC). V tomto případě je zapotřebí buď použít čtyři ESC, pro každý elektromotor jeden, nebo navrhnout vlastní řízení motorů. V modelu je pro měření jízdních stavů použita vývojová deska Arduino DUE. Pro její další využití je možné použít čtyři konvenční ESC a řídit je pomocí PWM signálu vyvedeného z arduina. Hlavním předpokladem je připojení všech zařízení na společnou zem. Návrh je znázorněn na obrázku 19. Řešení je realizovatelné pro obě navrhované úpravy podvozku.



Obrázek 19 Blokové schéma navrženého systému.

Vzhledem k úpravě modelu na nezávislý pohon všech kol by měly být zohledněny také úpravy řídicí ústředny. Dle blokového schématu na obrázku 19 vidíme, že PWM signál přijímaný přijímačem je odesílán na vstupy Arduina DUE. Arduino zpracuje požadavek a podle střídy PWM určí míru žádané rychlosti a převede jej na vstupy jednotlivých elektronických regulátorů otáček.

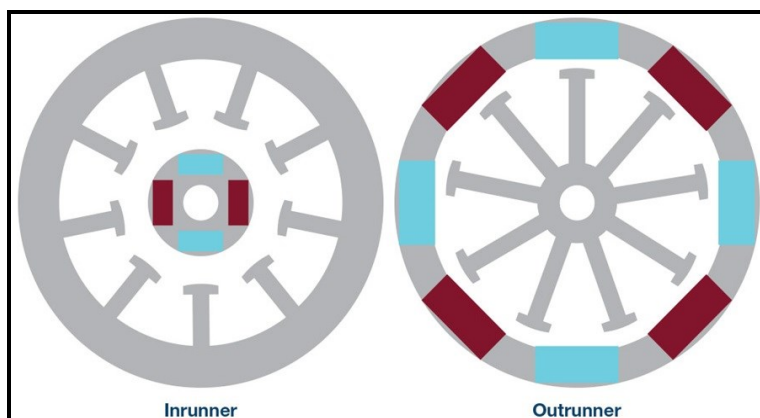
Takové řešení by ovšem v reálném světě fungovalo pouze pro přímočarý pohyb. V případě křivočarého pohybu je zapotřebí zahrnout korekční faktory pro bezproblémové zatáčení. Pokud by se všechna kola při průjezdu zatáčkou točila stejnou rychlostí, docházelo by k nedotáčivosti a prokluzu kol modelu. Je tedy žádoucí, aby se „vnitřní“ motory otáčely rychleji, což zlepší manévrovatelnost modelu. V praxi ovšem nemohou být tyto korekční faktory moc nízké. Pokud by se otáčky „vnitřních“ kol omezily příliš, docházelo by naopak k nekontrolované přetáčivosti automobilu. Typicky je řešení těchto poměrů mezi „vnitřními“ a „vnějšími“ koly zajištěno mechanicky pomocí samosvorného diferenciálu automobilu, což ovšem při nezávislém pohonu kol není možné.

V zásadě nemá smysl měnit stávající hardware řešení. Arduino DUE je vybaveno 32-bitovým procesorem s taktovací frekvencí 84 MHz. To by mělo zajistit dostatek výkonu, jak pro obsluhu jednotlivých měřicích modulů, potažmo měření jízdních stavů. Stejně tak by měl výkon stačit pro součinné řízení elektronických regulátorů otáček, dle navrženého systému.

5.1 Uložení motorů

Jako první věc je zapotřebí upravit podvozek pro použití čtyř elektromotorů. Vzhledem k omezenému prostoru bude zapotřebí použít čtyři menší motory. Volba typu motorů by, dle mého názoru, měla být podřízena výkonu aktuálně montovaného motoru. Motory by tak měly dodat alespoň stejný nebo vyšší výkon než aktuální pohonná jednotka.

V obou navrhovaných případech je z důvodu omezeného prostoru uvažováno použití menších motorů. V případě použití typicky automobilových motorů se jedná o motory s vnějším statorem (inrunner) a u leteckých motorů se naopak jedná o jednotky s vnitřním statorem (outrunner). Rozdílem je tedy konstrukce uložení. V obou případech je rotor tvořen permanentními magnety, kterými je otáčeno elektromagnetickým polem.

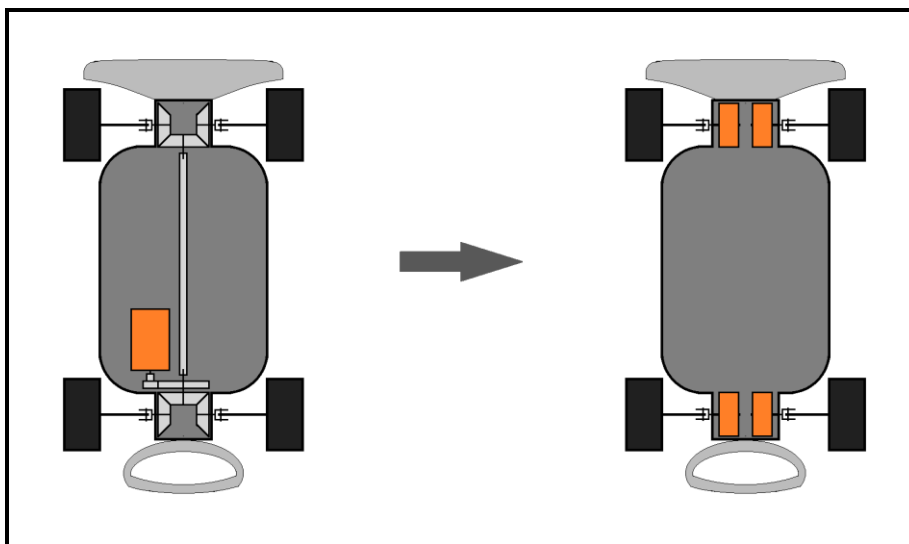


Obrázek 20 Vyobrazení motoru typu inrunner (vlevo) a typu outrunner (vpravo).

Vzhledem k fyzickému uspořádání tedy můžeme konstatovat, že letecké motory mají sice nižší nominální otáčky, ale za to vyšší točivý moment. To je dáno jednak typicky vysokým počtem pólů statoru, ale také delším ramenem, na kterém síla působí vůči středu motoru. Jak vidíme, spínané fáze jsou v tomto případě umístěny uprostřed motoru, což má za následek vyšší zahřívání. Outrunner motory jsou tedy veskrze „otevřené“, aby přes ně mohl proudit vzduch. Typicky pohánějí vrtuli letadla, takže vzduch je motorem prakticky protlačen. Při pohonu RC automobilu leteckým motorem by tak nemělo docházet k problémům z důvodu k nedostatku výkonu, ale spíše z důvodu teplot. Z hlediska řízení se motory neliší. Nutností je použití automobilových ESC, protože letecké regulátory nedisponují zpětným chodem – letadla jej nepotřebují. Z hlediska rychlosti můžeme očekávat nižší maximální rychlost.

5.1.1 Uložení motorů ve stejné rovině jako osa kola

Elektromotory použité ve Studentcar SCX jsou montovány na lichoběžníkových nápravách. Pro zachování co možná nejvyšší podobnosti mezi předlohou a modelem by bylo vhodné uložit motory podobným způsobem. Znázornění úpravy uložení motorů ve stejné rovině jako kola je zobrazeno na obrázku 21.



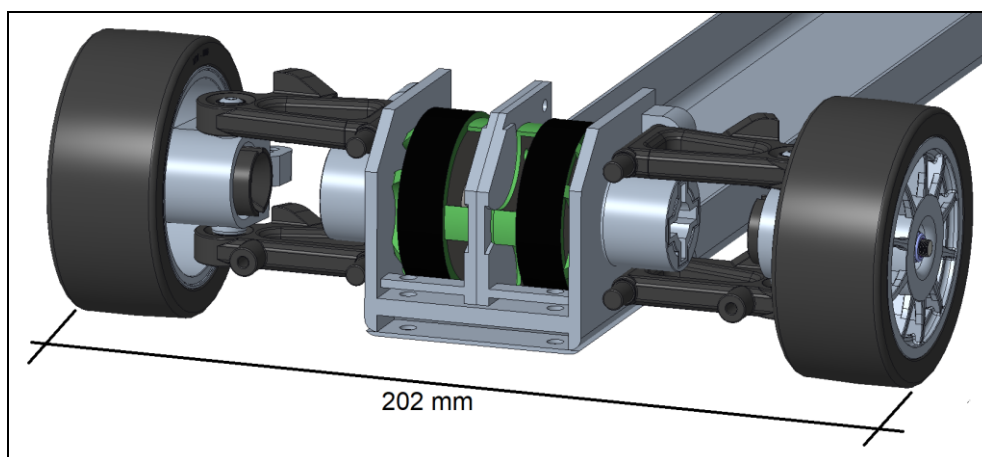
Obrázek 21 Původní (vlevo) uložení a uložení na osách kol (vpravo).

Jak vidíme na obrázku 21, z platformy jsou odebrány prakticky veškeré převody, které nejsou k pohybu zapotřebí. Odstraněny jsou oba diferenciály, hlavní převodové kolo a kardanová hřídel. Každý motor (označeny oranžově) je nově umístěn tak, aby byla osa otáčení ve stejné rovině jako poháněné kolo. K tomu budou s největší pravděpodobností potřebné úpravy podvozku. Jako nejschůdnější se jeví buď úprava aktuálně montovaných převodových skříní, nebo návrh vlastního řešení. Návrh vlastních převodových skříní je dle mého názoru vhodnější než pracná a zdlouhavá úprava původního řešení. K tomu je možné použít CAD software a návrh skříně na míru následně vytisknout pomocí technologie 3D tisku. Při odstranění nepotřebných dílů dojde také k uvolnění určitého množství místa na podvozku. Část bude zabrána novou elektronikou pro řízení elektromotorů, ale v omezené míře jej také můžeme využít pro zvýšení kapacity baterie a snížení těžiště podvozku.



Obrázek 22 Elektromotor typu 4220 pro modely letadel.

Jak jsem již zmínil, je nutností použít elektromotory menší velikosti, aby se na podvozek bez problému vtěsnaly. V úvahu připadají motory pro RC automobily o velikosti 380 s průměrem 28 mm nebo nižší. Ty jsou ovšem poměrně dlouhé. Další možností jsou nízko-profilové elektromotory používané v leteckých modelech, převážně ve dronech. Příklad vidíme na obrázku 22. Velice zevrubný návrh řešení v modelovacím softwaru Creo vidíme obrázku 23. Černě barevné díly jsou originální díly podvozku, šedé jsou navrženy na míru. Návrh je realizován s motory zobrazenými na obrázku 22.



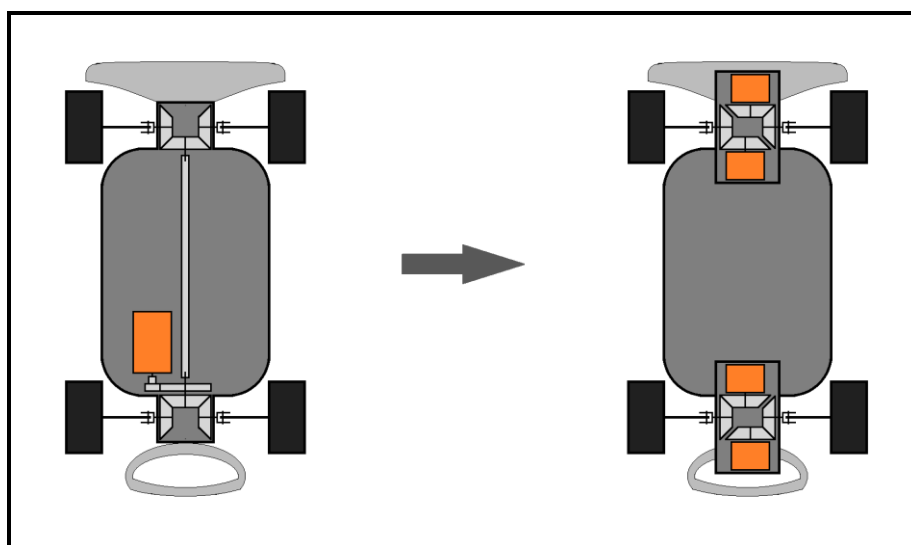
Obrázek 23 Prvotní návrh řešení uložení motorů ve stejné rovině jako osa kola.

Tabulka 7 Shrnutí uložení motorů v rovině s osami kol.

+ VÝHODY	- NEVÝHODY
Menší prostorové nároky	Menší zatížitelnost motorů
Jednoduché napojení unášeců	Vyšší nároky na chlazení motorů
Odpovídá uložení předlohy	Omezený výběr motorů

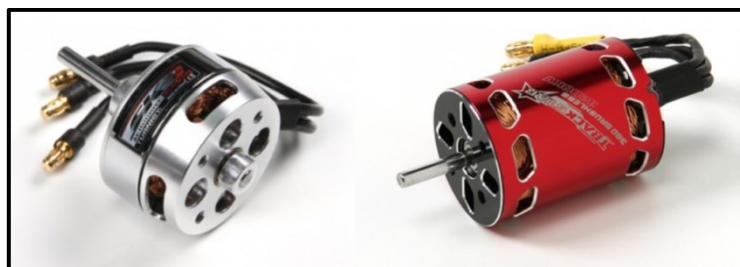
5.1.2 Excentrické uložení motorů na rovině kolmé vůči rovině osy kola

V tomto případě je uvažováno, že převodové skříně budou upraveny nebo navrženy nové tak, aby bylo převodové ústrojí v určité podobě zachováno. Aby bylo možné pohánět každé kolo zvlášť skrze převody, je zapotřebí zajistit excentrické uložení motorů vůči sobě. Stejně jako v předchozím případě jsou odstraněny původní diferenciály a jsou nahrazeny kuželovým soukolím. Každý motor poté převádí výkon přímo na převodové kolo a dále je výkon rozváděn na poloosy a kola skrze kuželové soukolí.



Obrázek 24 Původní uložení (vlevo) a excentrické uložení (vpravo).

V zásadě se jedná o podobné řešení jako v předchozím případě. Hlavním rozdílem je, že pro uložení motorů a převodů je zapotřebí více prostoru. To s sebou ovšem nese i jistou variabilitu v podobě možnosti použití pohonných jednotek větších rozměrů a výkonů. Příklady takových motorů vidíme na obrázku 25.



Obrázek 25 Elektromotory typu 3530 (vlevo) a 380 (vpravo), (převzato z [17] a [18]).

Tabulka 8 Shrnutí uložení motorů na rovině kolmé vůči rovině kol.

+ VÝHODY	- NEVÝHODY
Vyšší zatížitelnost motorů	Prostorově náročné
Nízká potřeba chlazení motorů	Složité řešení přenosu momentu
Výběr z více možností jednotek	Neodpovídá uložení předlohy
	Přesun váhy mimo podvozek
	Horší jízdní vlastnosti

Shrnutí

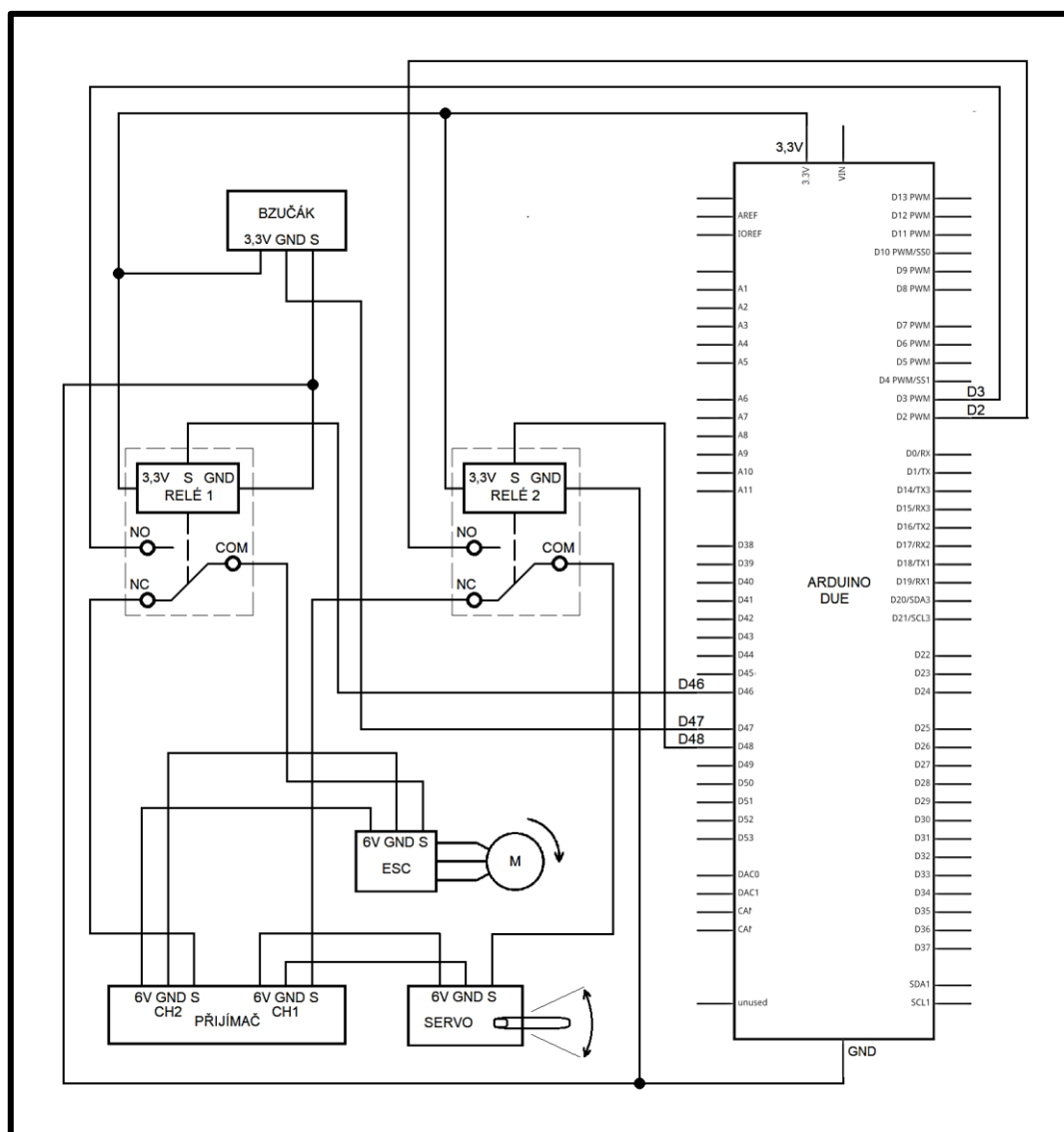
V této kapitole byly navrženy dva způsoby uchycení pohonných jednotek. Obě varianty mají svá pozitiva i negativa. Vzhledem ke shodě umístění s reálným umístěním se přikláním k první variantě, a sice umístění motorů na stejné ose jako kola. Prvotní návrh řešení je vyobrazen na obrázku 23. Motory použité v návrhu vidíme na obrázku 22. Obě možnosti pracují s použitím čtyř regulátorů otáček ovládaných pomocí signálu generovaného arduinem.

6 Realizace autonomních stavů

Při realizaci autonomních jízdních testů zprvu vyvstala otázka v podobě zajištění ovládání modelu pomocí arduina tak, aby byla zachována možnost ovládat model manuálně. Druhou otázkou představovalo samotné ovládání jízdních testů tak, aby byl současně zajištěn jistý uživatelský komfort.

6.1 Řízení manévrů pomocí Arduina

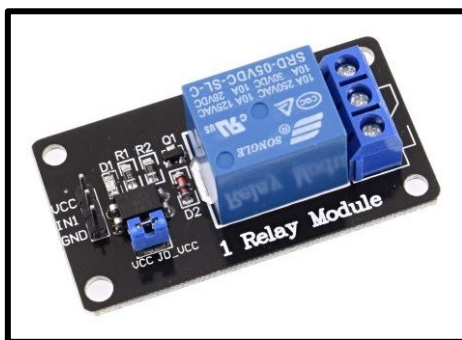
Při návrhu jsem vycházel z poznatků zjištěných při teoretickém průzkumu, kdy základní knihovna vývojového prostředí Arduino IDE „servo.h“ je používána právě pro řízení servomotorů. Z toho vyplývá, že generuje servosignál stejný nebo při nejmenším velice podobný servosignálu generovaného přijímačem RC soupravy. To zjednodušilo návrh řídicí logiky, kterou zastoupí Arduino DUE. Aby bylo možné zachovat možnost manuálního ovládání modelu mimo jízdní stavy, bylo zapotřebí nějakým způsobem přepínat mezi servosignálem přijímače a servosignálem arduina. Pro tuto funkci jsem se rozhodl využít reléových přepínačů, ovládaných opět arduinem. Z praktického hlediska velmi jednoduché, ale efektivní řešení, jehož kompletní zapojení k měřicí jednotce a vlastní elektronice modelu vidíme na obrázku 26.



Obrázek 26 Zapojení reléových modulů a bzučáku k měřicí jednotce a elektronice vozidla.

6.1.1 Reléové jednotky

Pro realizaci jsem zvolil reléové moduly pro ovládání silových obvodů s pomocným spínáním. Od běžných relé modulů a samostatných relátek se liší primárně právě napájecí částí se spínacími tranzistory. Klasické vývojové desky arduina totiž neposkytují dostatečný proud k sepnutí výkonových relé. Arduino poté spíná pouze optočlen, který spíná onen tranzistor. Výhodou je tak nejen galvanické, ale také optické oddělení spínací a spínané části. Moduly navíc disponují možností tuto logiku obejít pomocí jumperu, ale obecně bych u vývojových desek takové řešení nedoporučoval. Mohlo by docházet minimálně k nechtěnému rozepínání kontaktů, v horším případě by spínání nefungovalo vůbec. Použité reléové jednotky můžeme vidět na obrázku 27. Pracovní napětí činí 5V, spínaný výkon může dosahovat maximálně 250 VAC / 10 A a disponují světelnou indikací při sepnutí. Logika

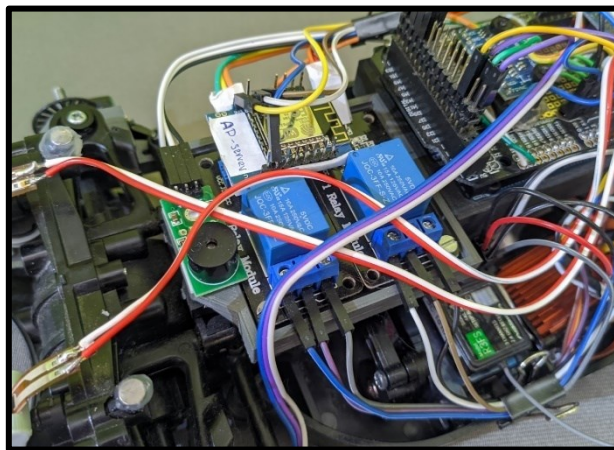


Obrázek 27 Relé moduly použité v práci.

Základní technické specifikace:

- Pracovní napětí 5 V, spínaný výkon maximálně 250 VAC / 10 A,
- Logika LOW trigger, tedy sepnutí přivedením logické nuly, světelná indikace při přepnutí.

Připojení obou modulů vidíme na obrázku 26. Můžeme si povšimnout, že ve výchozím stavu obou relé NC (Normally Closed), je na vstup ESC a servomotoru přiveden signál z přijímače. To znamená, že ve výchozím stavu je autíčko ovládáno manuálně uživatelem. Po požadavku na vykonání jízdního manévru dojde k přestavení příslušných relátek do polohy NO (Normally Open) a kontrolu nad pohonnou jednotkou (RELÉ 1), potažmo servomotorem (RELÉ 2), přebírá arduino. Po vykonání jízdního stavu dochází k přestavení zpět do stavu NC a vozidlo je znovu možné ovládat manuálně.

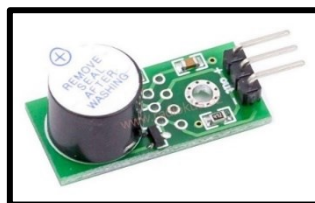


Obrázek 28 Uchycení reléových modulů v boxu na nosníku.

Obě jednotky bylo zapotřebí na model automobilu nějakým způsobem uchytit. Rozhodl jsem se využít zbývajících místa na podélném nosníku vedle měřicí jednotky a v systému Creo jsem navrhl krabičku pro jejich umístění. Box byl vytisknut na mé 3D tiskárně z materiálů PLA s vyplněním 25 %. Detail na moduly uchycené v krabičce a připevněné na nosník automobilu můžeme vidět na obrázku 28. Jejich umístění vůči zbytku elektroniky je dobře patrné na obrázku 9.

6.1.2 Zvuková signalizace

Při práci na modelu jsem si povšimnul jednoho nepříjemného neduhu. V případě, že nebyla do microSD slotu měřicí jednotky umístěna SD karta, nedošlo k její inicializaci a program zůstal tak zvaně „viset“ v nekonečné smyčce `while()`. Měřicí jednotka se v tom případě nespustila a pokud si uživatel chybějící microSD karty nepovšimnul, neměl prakticky tušení, co se děje. Abych tomuto nešvaru zamezil, rozhodl jsem se zakoupit tak zvaný piezobužák a zařadil jej do návrhu. Použitý modul můžeme vidět na obrázku 29, jeho připojení k arduinu vidíme na obrázku 26. Jedná se o aktivní bzučák, což znamená, že má veškerou elektroniku potřebnou k řízení již integrovanou v modulu. Napájí se pomocí napětí o hodnotě 3,3 V a je spínán separátním kontaktem logickou nulou – LOW trigger.



Obrázek 29 Piezobužák F05714.

Mnou navržená funkce spočívá v tom, že v případě, zda není vložena microSD karta, program se i přesto zacyklí v nekonečné smyčce, ovšem umístil jsem do ní kód pro neustálé pípání s periodou 0,5 s. Ve skutečnosti se toho až tolik nemění, jednotka stále „visí“, ale uživatel má alespoň jakousi zpětnou vazbu. To samé platí o jízdních stavech a aby tak bzučák poté nezůstal ladem, zakomponoval jsem jeho funkci také do samotných jízdních manévřů. Příklad kódu dvojího pípnutí vidíme na obrázku 30.

Funkce:

- Nedetekována microSD karta – neustálé pípání s periodou 0,5 s,
- Spuštění a ukončení jízdního TESTu 1 – jedno krátké pípnutí,
- Spuštění a ukončení jízdního TESTu 2 – dvě krátké pípnutí.

```
//Po dokončení jízdního stavu 2, bzučák 2x pípne
digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW); //Pípnutí č. 1
delay(100);
digitalWrite(BUZZER_PIN, HIGH);
delay(100);
digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW); //Pípnutí č. 2
delay(100);
digitalWrite(BUZZER_PIN, HIGH);
```

Obrázek 30 Kód dvojitého pípnutí při použití jízdního testu 2.

6.1.3 Stabilizace při jízdě

Při testování jsem došel k závěru, že by bylo vhodné jízdni manévry, primárně tedy losí test, opatřit stabilizací kol. Konkrétní ideu představuje řízené natáčení servomotoru tak, aby automobil udržel při jízdě v přímce. V případě losího testu to znamená prudké vytočení kol, následně stabilizované tak, aby jel automobil stále rovně. Vzhledem k použitému modulu MPU9250 je toho možné docílit několika způsoby.

Jako první možností jsem se zabýval použitím akcelerometru v kombinaci s magnetometrem a přes Eulerovy úhly dopočítat úhly rotace okolo jednotlivých os. Po její realizaci jsem ovšem zjistil fatální nedostatky tohoto řešení. Marginálním problémem, který je možné do určité míry řešit softwarovou filtrací, je nepřesnost akcelerometru a jeho šumová imunita. I po realizaci čtvrtinové filtrace docházelo v klidové poloze k neustálým změnám vypočtených hodnot a servomotor tak neustále „poskakoval“. To není vhodné z důvodu vysoké zátěže serva a s tím souvisejícím zahříváním. Softwarové řešení je navíc poměrně složité a myslím, že při zbytečně náročné na výkon. Daleko rozsáhlejším problémem se vyjevilo vysoké ovlivnění magnetometru magnetickým polem BLDC motoru pohonné jednotky. Řešení tak fungovalo pouze do té doby, než se motor protočil, kdy došlo k narušení kalibrace magnetometru a posunutí hodnot při každé otáčce motoru. Řešení jsem tedy zavrhnul.

Jako druhým a konečným způsobem jsem se zabýval stabilizací pomocí gyroskopu. Tato realizace se vyjevila jako velice vhodná, kdy i při malým pohybům nedochází k neustálému přepisování měřených hodnot. Gyroskop ovšem měří úhlovou rychlost, bylo tedy zapotřebí ji přepočítat na úhel rotace od nulové polohy. Nulová poloha je navíc vždy vhodně vyresetována při každém spuštění jednotky a je dána směrem, kterým automobil míří po zapnutí. Aby bylo možné vypočítat úhel natočení, je nutné měřenou úhlovou rychlost převést z radiánů na stupně a poté diskrétně integrovat. Toho jsem docílil vynásobením pomocí rozdílu času mezi jednotlivými vzorky z gyroskopu. Konkrétní úryvek kódu výpočtu úhlu natočení, pouze s chybějícím převodem na stupně, vidíme na obrázku 31. Nevýhodou tohoto řešení je zanášení chyby integrace ve formě driftu, kdy dochází k postupnému odchýlení od nulové pozice. Jízdni testy jsou však prováděny vždy pouze chvíli a vždy dochází k nulování proměnných, což problém eliminuje.

```
sample = gz;
t = millis();
dt = millis() - prevt;
dang = sample * dt;
curang = curang + dang;
prevt = t;
```

Obrázek 31 Ukázka kódu pro výpočet úhlu natočení z úhlové rychlosti gyroskopu.

6.1.4 Jízdni stavy

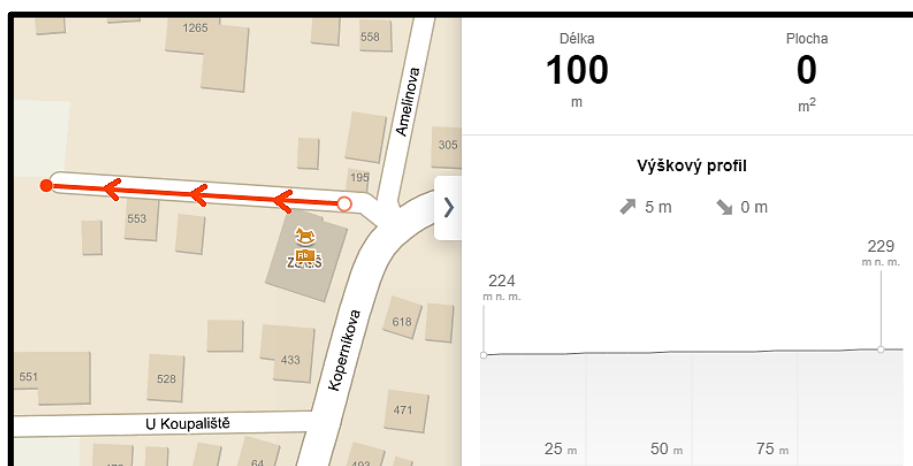
Pro autonomní ovládání modelu bylo nutné určit délku pulzu řídicího servosignálu tak, abych byl schopen definovat rychlost jízdy při jízdniích manévrech. Vzhledem k měřítku 1:10 jsem zvolil v měřítku také rychlost pohybu o velikosti $v = 8 \text{ km/h}$, tedy 80 km/h v případě skutečného automobilu. Znázornění obou testů vidíme na obrázku 17 a obrázku 18. Proto jsem se rozhodl naměřit závislost úhlu servosignálu na rychlosti pohybu automobilu. Pojal jsem to velmi jednoduše. Různé hodnoty servosignálu jsem si předprogramoval namísto jízdniích stavů a venku jsem si postavil dráhu o délce $s = 4 \text{ m}$. Autíčko

jsem umístil přibližně dva metry před startovní čáru, aby se stihlo rozjet na konstantní rychlost a já mohl měřit čas průjezdu touto dráhou. Provedl jsem sérii pěti měření pro každou hodnotu servosignálu.

Tabulka 9 Naměřené hodnoty času, jejich průměr a vypočtené hodnoty rychlosti.

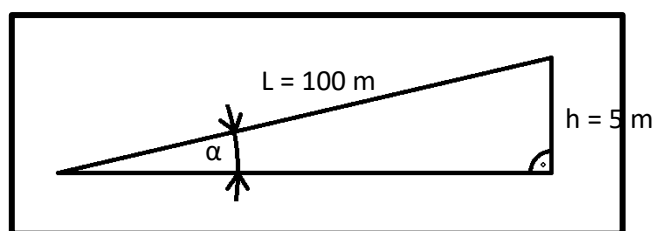
SERVO	°	90	95	100	105	110	115	120	125
t	s	-	-	8,28	1,78	1,00	0,77	0,66	0,54
				8,48	1,71	1,02	0,85	0,58	0,58
				8,21	1,71	1,13	0,91	0,66	0,54
				8,11	1,59	1,08	0,84	0,65	0,52
				8,19	1,65	1,07	0,81	0,66	0,54
t _{AVG}	s	-	-	8,25	1,69	1,06	0,84	0,64	0,54
v	m/s	0,00	0,00	0,48	2,37	3,77	4,78	6,24	7,35
v _P	km/h	0,00	0,00	1,74	8,53	13,58	17,22	22,48	26,47

Vhodné je také zmínit, že jsem měření probíhalo na asfaltové cestě s mírným sklonem. Směr jízdy byl jsem zvolil do kopce z důvodu kratší brzdné dráhy v případě jakéhokoliv selhání. Naměřené hodnoty tak přesně neodpovídají pohybu po horizontální vozovce, ale rozdíl by neměl být příliš velký. Sklon kopce je totiž nízký, konkrétní hodnotu jsem zjistil pomocí funkce měření výškového profilu na online mapách Seznam Mapy. Výškový profil s vyznačeným směrem jízdy vidíme na obrázku 32.



Obrázek 32 Výškový profil testovací vozovky s vyznačeným směrem jízdy.

Můžeme vidět, že na části vozovky o délce 100 m činí rozdíl převýšení přibližně 5 m. Určení sklonu kopce a úhlu sklonu je poté jednoduché, v zásadě se jedná o základní matematické vztahy při výpočtu trojúhelníka. Znázornění uvažovaného kopce vidíme na obrázku 33.



Obrázek 33 Znázornění testovací vozovky.

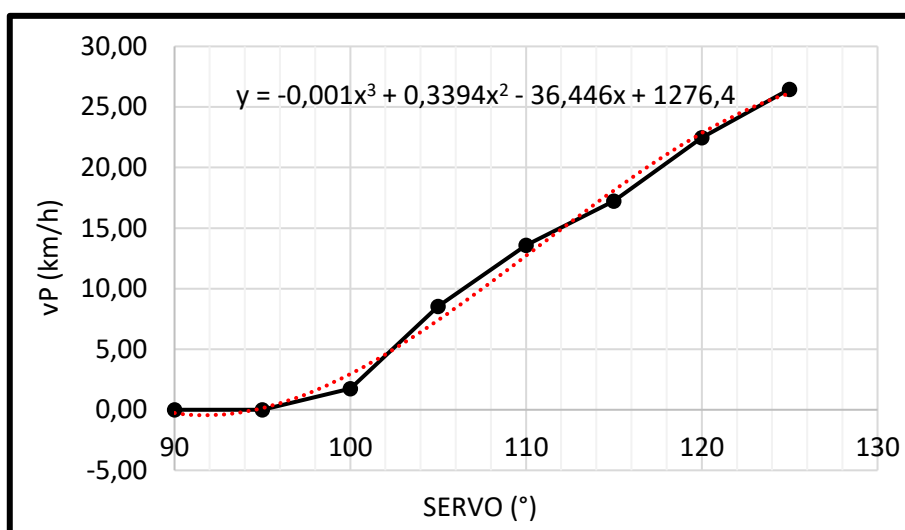
Sklon se vypočítá jako:

$$s = \frac{h}{L} \cdot 100 = \frac{5}{100} \cdot 100 = 5 \% \quad (6.1)$$

A úhel stoupání vozovky je roven:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{h}{L} = \tan^{-1} \frac{5}{100} = 2,862^\circ \quad (6.2)$$

Mohu tedy konstatovat, že sklon vozovky není příliš velký. Model navíc není moc těžký a je poháněn relativně silnou pohonnou jednotkou. Měření by tak mělo poměrně dobře odpovídat i nenakloněné vozovce. Výsledky vidíme v tabulce 9 a závislost rychlosti na servosignálu vidíme na obrázku 34. Můžeme si povšimnout, že i při úhlu servosignálu 95° se autíčko stále nepohybuje, ale stojí na místě. Stejné chování model vykazuje až do hodnoty servosignálu 98° . V řízení se tedy nachází určitá mrtvá zóna. Maximální měřený úhel činil 125° . Dále jsem nepokračoval z důvodu nedostatku prostoru a možnosti poškození modelu. Vidíme, že závislost je po překonání mrtvé zóny téměř lineární.



Obrázek 34 Závislost naměřené rychlosti na hodnotě úhlu servosignálu.

Průměrnou hodnotu rychlosti jsem následně vypočetl dle vztahu (4.4) a následně přepočtl na kilometry za hodinu. Příklad výpočtu:

$$v_p = \frac{s}{t_{AVG}} = \frac{4,00}{1,69} = 2,37 \text{ m/s} \cdot 3,6 = 8,53 \text{ km/h} \quad (6.3)$$

Jízdní stav 1, manévr plyn-brzda

Oba manévry jsou tedy ovládány pomocí servosignálu o zvolené hodnotě. Na základě zvolené rychlosti pohybu modelu $v = 8 \text{ km/h}$ a měření uvedeného v tabulce 9 jsem zvolil hodnotu úhlu servosignálu 104° , která by této rychlosti měla odpovídat.

Manévr plyn-brzda je poté konán v hlavní smyčce Arduino DUE, kdy dochází ke kontrole požadavku na provedení jízdního stavu pomocí podmínky *if*. Po stisknutí tlačítka se tak provede výchozí nastavení

nutné nebo vhodné pro provedení testu, inicializuje se měření, a následně program pracuje ve smyčce *while()* do té doby, než dojde k požadavku na ukončení testu pomocí příznaku v programu. Hodnota servosignálu pro ovládání rychlosti je do regulátoru otáček zapisována pomocí funkce *motor.write()*. Obdobně je to se zapisováním hodnoty pro natočení servomotoru pomocí funkce *servom.write()*. Ta je v tomto testu využita pouze pro gyroskopickou stabilizaci. Po dokončení jízdního stavu je do obou jednotek zapsána hodnota servosignálu 90° pro klidovou pozici a po přepnutí relátek se program vrátí do hlavní smyčky arduina. Zde čeká na další příkazy, přičemž v té době je možné s modelem manuálně jezdit. Úryvek nejdůležitější, tedy ovládací, části kódu jízdního testu 1 vidíme na obrázku 35. Části inicializace měření, ukládání měření a gyroskopické stabilizace, v textové části nejsou uvedeny.

```
//__JÍZDNÍ STAV 1__
if (digitalRead(BUTTON1_PIN) == LOW) { //Klik tlačítka TEST1 na ovladači

    //Setup jízdního stavu 1
    int check1 = 1; //Příznak pro ukončení jízdního stavu
    int brzdal = 1; //Příznak pro brzdu

    gz = 0.0; //Nulování proměnných pro korektní měření a eliminaci driftu gyroskopu
    sample = 0, t = 0, dt = 0, dang = 0, curang = 0, prevt = 0, korekce = 0, curang_out = 0;

    motor.write(steadyPos); //Nulové počáteční otáčky pohonné jednotky
    servom.write(steadyPos); //Nulová (středová) počáteční pozice servomotoru

    delay(1000); //Počkání na přestavení relátek a zároveň friendly pauza, než se auto rozjede

    //Hlavní smyčka jízdního stavu 1
    while (check1 == 1) {

        //Auto jede - plyn dokud nedojde k brzdění
        if(brzdal == 1){
            motor.write(104);
        }

        //Po 3,5s dojde k brzdění
        if(millis() - startMeasurement >= 3500) {
            motor.write(89); //Brzda
            brzdal = 0;
        }

        //Ukončení jízdního stavu po 5s a ukončení měření
        if(millis() - startMeasurement >= 5000) {
            check1 = 0;
            myFile.close();
            //Serial.println("file closed");
            digitalWrite(LED_PIN, LOW);
        }
    }

    motor.write(steadyPos); //Nulové koncové otáčky pohonné jednotky
    servom.write(steadyPos); //Nulová (středová) koncová pozice servomotoru
};
```

Obrázek 35 Ukázka kódu pro ovládání jízdních stavů.

Jízdní stav 2, manévr losí test

Pro manévr losího testu v zásadě platí stejné principy a postup funkce, jako v případě manévru plyn-brzda. Totožný je také veškerý zdrojový kód, který vidíme na obrázku 35. Hlavní a vlastně jediný rozdíl

spočívá v ovládní servomotoru tak, aby v průběhu testu autíčko vybočilo do jiného jízdního pruhu (zatočení vlevo) a po určité době ustálené jízdy se opět vrátilo do původního jízdního pruhu (zatočení vpravo). V průběhu těchto vybočení není stále funkční gyroskopická stabilizace, jelikož by docházelo ke konfliktu, kdy by gyroskop toto zabočení ihned vyrovnal. Navíc je potřeba docílit prodlevy k přestavení servomotoru. Část zdrojového kódu, která je od jízdního manévru plyn-brzda odlišná a je důležitá pro manévr losího testu, vidíme na obrázku 36.

```
//Hlavní smyčka jízdního stavu 2
while (check2 == 1) {
    //.... předcházející kód
    //Vybočení do jiného jízdního pruhu - natočení kol vlevo po 1,5s
    if(millis() - startMeasurement >= 1500 && left1 == 0){
        for(angle1 = steadyPos; angle1 <= 150; angle1++){
            servom.write(angle1);
            delay(1); //Delay potřebný pro generaci správné hodnoty střidy, menší nefunguje
        }
        delay(20); //Delay potřebný pro natočení kol do požadované pozice
        left1 = 1; //Příznak, aby došlo k natočení jen jednou, ne při každém průchodu smyčkou
    }

    //Vybočení do jiného jízdního pruhu - natočení kol vpravo po 2,5s
    if(millis() - startMeasurement >= 2500 && left2 == 0){
        for(angle1 = angle1; angle1 >= 60; angle1--){
            servom.write(angle1);
            delay(1);
        }
        delay(20);
        left2 = 1;
    }

    //Ustálená jízda 2s

    //Navrácení do původního jízdního pruhu - natočení kol vpravo po 4,5s
    if(millis() - startMeasurement >= 4500 && right1 == 0){
        for(angle2 = steadyPos; angle2 >= 30; angle2--){
            servom.write(angle2);
            delay(1);
        }
        delay(20);
        right1 = 1;
    }

    //Navrácení do původního jízdního pruhu - natočení kol vlevo po 5,5s
    if(millis() - startMeasurement >= 5500 && right2 == 0){
        for(angle2 = angle2; angle2 <= 150; angle2++){
            servom.write(angle2);
            delay(1);
        }
        delay(20);
        right2 = 1;
    }

    //.... navazující kód
}
```

Obrázek 36 Dodatečná část kódu jízdního stavu 2.

6.2 Dálkové ovládání

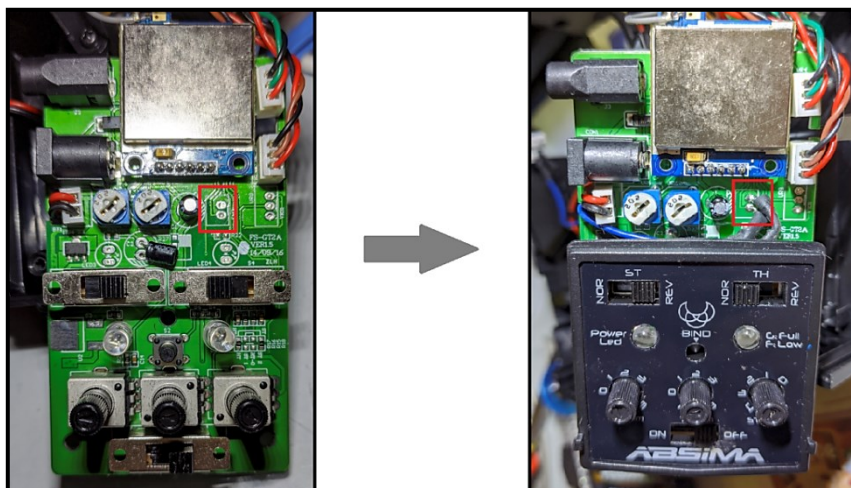
V prvé řadě přišlo samozřejmě na mysl, zda by nebylo možné využít funkce použitého rádia tak, aby bylo možné jízdní testy volit. Dle specifikací ovšem bylo zjevné, že vysílačka není za tímto účelem zkonstruována, a proto připadala v úvahu pouze její fyzická modifikace. Po rozebrání a prozkoumání jsem zjistil, že prakticky není možné hardwarové řešení modifikovat například přidáním mikrosvínače. Po přidání mikrosvínače by navíc bylo zapotřebí modifikovat také softwarové vybavení jak vysílačky, tak přijímače. Vysílačka disponuje wifi modulem, který není vybaven USB, takže softwarová modifikace nepřipadá v úvahu. Po tomto zjištění jsem tuto cestu zavrhl, takže přijímač jsem poté již nezkoumal. Při prozkoumání vysílačky jsem našel také jedno pozitivum v podobě pouze nezapojeného třetího kanálu. Rozhodl jsem se jej zprovoznit jen ze zajímavosti, postup je popsán v následující kapitole.

Řešení jsem tedy hledal v komunikaci oddělené od komunikace samotné RC soupravy. Po průzkumu možných způsobů jsem zvolil komunikaci pomocí dvou separátních wifi modulů. Z toho prakticky vyplývá, že jeden z modulů byl umístěn na automobilu a druhý modul na vysílače.

6.2.1 Úpravy hardwarového řešení RC soupravy

Jak již bylo zmíněno v popisu modelu, přijímač signálu pro ovládání modelu disponuje celkem třemi kanály (3CH), zatímco samotná vysílačka, dle výrobce, disponuje pouze dvěma kanály (2CH). Po rozebrání a prozkoumání vysílačky jsem zjistil, že vysílačka jako řídicí desku využívá obvod od společnosti Flysky model GT2A. To je vcelku běžná, levná souprava a její různé obdoby třemi kanály (3CH) disponují. To mě donutilo elektroniku vysílačky dále zkoumat. Jak mi napovídalo mé podezření, je onen třetí kanál na tištěném spoji vyveden, ale nevyužit. Zajímavostí je, že deska pro komunikaci s přijímačem používá modul velice podobný klasickým arduino WiFi modulům s mikroprocesorem. Modulace signálu je však s největší pravděpodobností odlišná. Napětí na třetím kanálu změřené multimetrem činí 3,3 V.

Funkci třetího kanálu jsem otestoval připojením servomotoru na třetí kanál přijímače. Po připojení a spojení obou kontaktů na tištěném spoji pomocí mikrosvínače je servomotor přestavován. Třetí kanál tedy bez problému funguje. Nevýhodou je, že není možné nijak regulovat hodnotu výstupu. Výstupem je PWM signál, který momentálně nejsem schopen změřit z důvodu absence osciloskopu. Pokud by pro to bylo nějaké využití, arduino by mělo být možné naprogramovat tak, aby signál dekodovalo.



Obrázek 37 Umístění (vlevo) a zapojení (vpravo) třetího kanálu na desce vysílačky.

Jako tlačítko jsem použil mikrospínač používaný v počítačových myších. Hlavním důvodem je, že tyto spínače ve většině případů nezpůsobují velké zákmity, takže nedochází k chybné detekci stisknutí. To bylo také ověřeno několika násobným stisknutím a vždy došlo ke správné detekci. Je to jen má domněnka, ovšem zákmity tlačítek jsou dle mého názoru ošetřeny také v programu mikrokontroléru vysílače. Spínač jsem provizorně vyvedl skrze mezeru vytvořenou pájkou do krytu rádia, vidíme na obrázku 37. Pokud bude tento spínač použit k ovládání třetího kanálu, bylo by vhodné jeho umístění modifikovat.

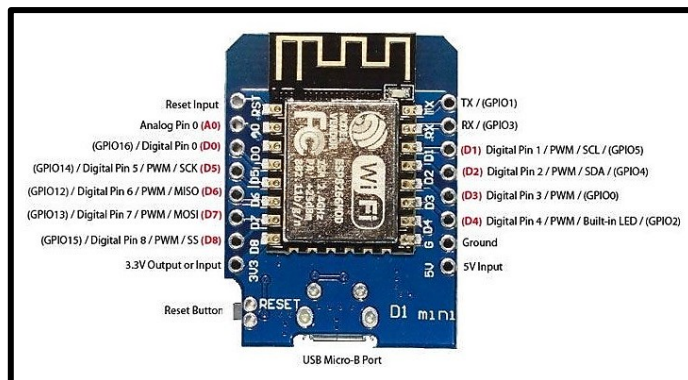


Obrázek 38 Umístění mikrospínače na vysílací jednotce.

Jak jsem již zmínil, řešení ovládání jízdních stavů přes třetí kanál není ani vhodným, ani jednoduchým řešením. Možností by bylo experimentovat a zakoupit novou, vícekanálovou RC soupravu. Nabízí se například 5-ti kanálová RC souprava DX5C od společnosti Spektrum. Každý manévra by teoreticky tedy bylo možné spouštět vlastním kanálem, resp. tlačítkem. Nemám tuto informaci ověřenou, ale předpokládám, že i tyto kanály ovšem poskytují pouze PWM signál, nikoliv logické úrovně. V manuálu DX5C jsem však o této problematice nenalezl více informací. Nevýhodou vícekanálových souprav je ale poměrně vysoká cena, v případě DX5C i s přijímačem činí okolo 3400, – Kč.

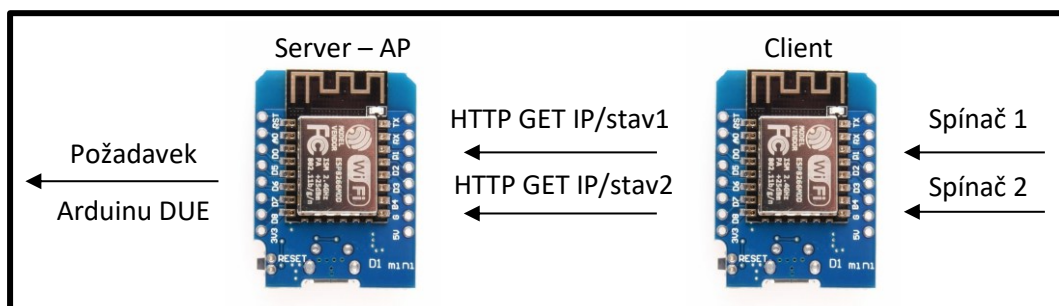
6.2.2 Server-client komunikace

Vhodné řešení pro ovládání jízdních stavů jsem našel v tak zvané server-client komunikaci dvou wifi modulů založených na čipu ESP8266. Konkrétní, mnou navržené, řešení sestává z modulů Wemos D1 mini, které jsou kompatibilní se systémy arduino vývojových desek. Modul disponuje devíti digitálními I/O porty, jedním analogovým I/O a také vlastním mikroprocesorem, takže je uživatel limitován prakticky jen vlastní představivostí. Programování, případně také napájení, je realizováno přes microUSB port. Modul se typicky napájí napětím 3,3 V nebo 5 V, podle zapojení.



Obrázek 39 Wifi modul Wemos D1 mini (převzato a upraveno z [19]).

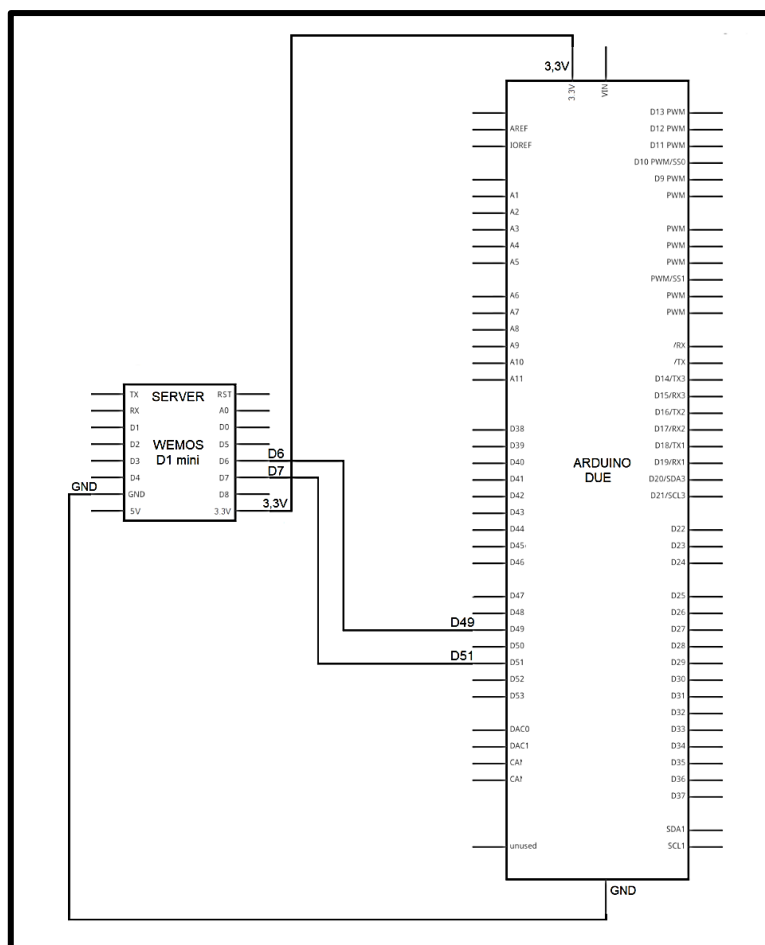
Wemos D1 mini jsem zvolil z několika důvodů. Jedním z nich je samozřejmě více než dostatečný počet I/O portů, aby bylo v budoucnu případně možné realizovat dodatečné úpravy nebo rozšíření. Druhým důvodem je nízká spotřeba čipu ESP8266, která v nejhorším případě při odesílání 1024 byte packetu s intenzitou signálu -65 dBm, činí 56 mA. Výkon čipu je také při taktovací frekvenci 80 MHz na danou aplikaci více než dostatečný. Typická rychlost komunikace činí 115200 baud. Samotná komunikace mezi jednotkami je založena na TCP/IP pomocí řetězců protokolu *http*, vidíme na obrázku 39. [20]



Obrázek 40 Vyobrazení realizované komunikace wifi modulů.

Server jednotka

V případě modulu na RC automobilu jsem se rozhodl jej napájet přímo z Arduinu DUE přes 3,3 V linku. Není tedy třeba dodatečných úprav. Pro ovládání jízdních testů je jednotka s arduinem propojená přes piny D6 a D7, kdy generuje impuls na vstupy D49 a D51. Možné je také zařazení rezistorů pro omezení proudu. Zapojení vidíme na obrázku 40. Umístění jednotky na modelu vidíme na obrázku 28.



Obrázek 41 Zapojení Access Point modulu k Arduinu Due.

Jak jsem zmínil, komunikace je zajištěna TCP/IP přes protokol *http*. Server jednotka vyčká na příjem specifického, v kódu smyčky *setup()* daného, HTML řetězce. Funkce *handleClient()* v hlavní smyčce kontroluje, zda byl některý z těchto řetězců přijat. Pokud ano, funkce po jeho přijetí zavolá funkci žádaného jízdního stavu. Úryvek důležitých částí kódu vidíme na obrázku 41.

```
void setup() {
  WiFi.softAP(ssid);//, password); //Nastavení a spuštění ESPčka jako Server - Access Point
  server.on("/Stavl", jizdniStavl); //Řetězec pro požadavek na vykonání jízdního stavu 1, je
  //to string který se kontroluje, zda byl přijat, klient
  //tento string pošle na server, vykoná se příslušný test
}

void loop() {
  server.handleClient(); //Čekání na požadavek od klienta (čeká se na daný string)
}

//Jízdní stav 1
void jizdniStavl(){

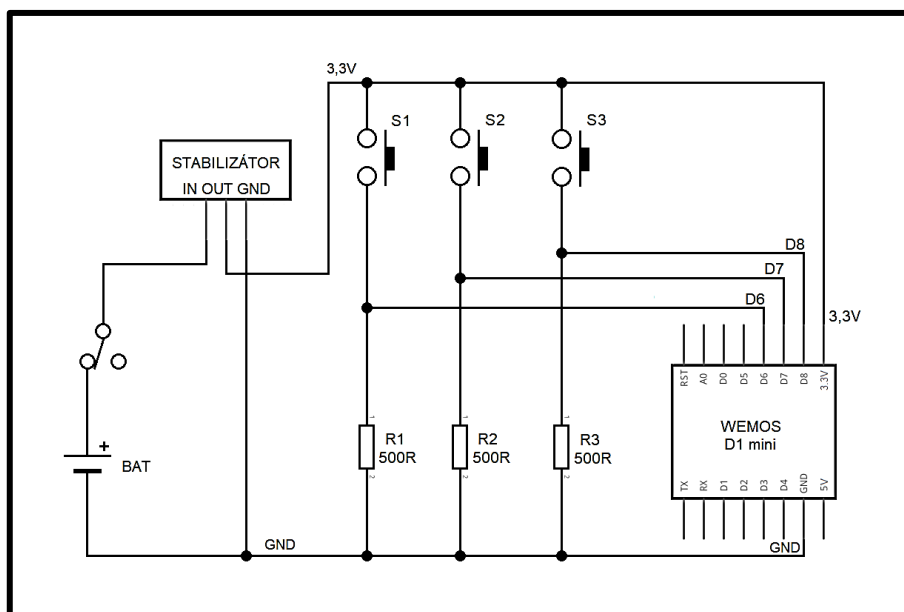
  //Simulace tlačítka - po stisku na hardware klienta dojde na serveru k impulsu logické úrovně
  digitalWrite(12,LOW);
  delay(100);
  digitalWrite(12,HIGH);

  //Komunikační řetězec
  String s = "\r\n\r\n <!DOCTYPE HTML>\r\n<html><hl>Esp8266 Communication</hl> ";
  s += "<p>Stavl proveden.</html>\r\n\r\n"; //Zapsání HTML řetězce o úspěchu do řetězce "s"
  server.send(200,"text/html",s); //Odpověď klientovi v podobě stringu v proměnné "s" - tedy
  // "Stavl proveden." v případě úspěšného přenosu
}
```

Obrázek 42 Ukázka kódu komunikace na straně server jednotky.

Client jednotka

Napájení jednotky na vysílače je zajištěno přímo z baterie rádia. Vysílačka byla tedy modifikována a pro potřeby napájení byly kladný a záporný pól vyvedeny kabeláží pod krytku funkcí. Zapínání jednotky spočívá na posuvném přepínači. Pro definování správné úrovně napájecího napětí 3,3 V jsem použil napájecí modul se stabilizátorem AMS1117.



Obrázek 43 Zapojení client modulu na vysílače.

Elektrické zapojení klienta odpovídá potřebám pro ovládání jízdních stavů, tedy byly k jednotce připojeny 3 mikrospínače s pull-up rezistory. Kompletní zapojení vidíme na obrázku 42. Můžeme si povšimnout, že je vyvedeno také třetí tlačítko. V momentálním návrhu nemá žádnou funkci, osadil jsem jej pouze pro případ, kdyby byl z jakéhokoli důvodu v rychlosti potřeba dodatečný spínací prvek.

Komunikaci opět jako v předchozím případě zajišťuje TCP/IP skrze *http* protokol, jinak by nedocházelo k přenosu informací. V tomto případě je princip podobný, jen opačného rázu. Po inicializaci a připojení client jednotky k server jednotce pomocí IP adresy a SSID sítě, kontroluje zařízení ve smyčce *loop()*, zda došlo ke stisku tlačítka. Pokud ano, naváže client komunikaci s AP a pomocí funkce *client.print()* odešle předem daný string v jazyce HTML. Klíčové je právě část řetězce */Stav1*, díky které se server dozvídá, který jízdní stav má provést. Tato klíčová část řetězce je tedy dána pevně v programu obou jednotek. Zbytek řetězce představuje informace o IP adrese, na kterou se řetězec odesílá. Ukázku důležitých částí kódu vidíme na obrázku 43.

```
void setup() {
  pinMode(13, INPUT);    //Pin D7 (13) jako vstup
  pinMode(12, INPUT);    //Pin D6 (12) jako vstup
  WiFi.mode(WIFI_STA);   //Nastavení ESPčka jako station mode - client
  WiFi.begin("RC_Car");  //SSID server ESPčka

  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) { //Počkání na přiřazení IP adresy DNS serverem AP
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
}

void loop() {

  //Jízdní stav 1 - první spínač
  if(digitalRead(13)==1){    //Kontrola, zda bylo tlačítko stisknuto

    WiFiClient client;      //Použití třídy WiFiClient pro vytvoření a navázání TCP připojení
    const int httpPort = 80; //Port komunikace

    if (!client.connect("192.168.4.1", httpPort)) {
      Serial.println("Připojení se nezdařilo.");
      return;
    }

    //String požadavku pro vykonání jízdního stavu 1
    client.print(String("GET ") + "/Stav1" + " HTTP/1.1\r\n" +
      "Host: " + host + "\r\n" +
      "Connection: close\r\n\r\n");

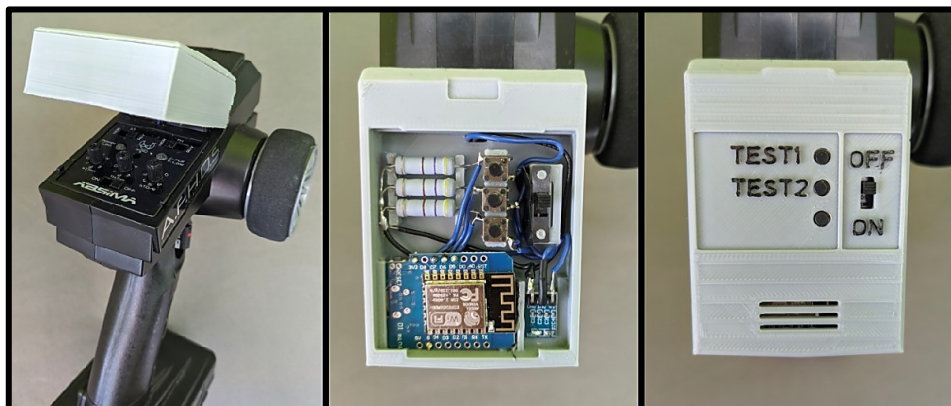
    delay(10);

    //Počkání na odpověď serveru
    while(client.available()){
      String line = client.readStringUntil('\r');
      Serial.print(line);
    }
  }
}
```

Obrázek 44 Ukázka kódu komunikace na straně client jednotky.

Aby z vysílačky mikrospínače a ostatní prvky pouze nevisely do prázdna, rozhodl jsem se vše uložit do plastové krabičky integrované na vysílačku. Navrhnul jsem tedy uložení komponent na míru

v systému Creo a vytiskl jej na 3D tiskárně. Krabíčka v podstatě nahrazuje původní krytku funkcí, přičemž je výklopná, takže veškeré ovládací prvky zůstaly zachovány. Krabíčka je otevíratelná se zasekávacím víčkem. Interiér i exteriér krabíčky můžeme vidět na obrázku 44. V interiéru si můžeme povšimnout, že byly použity 2W rezistory, což je naprosto zbytečné a zabírají mnoho místa. Bohužel jsem provedl chybu při objednávce komponent, na funkci to naštěstí nemá žádný vliv.



Obrázek 45 Pohled na umístění krabíčky, interiér a exteriér.

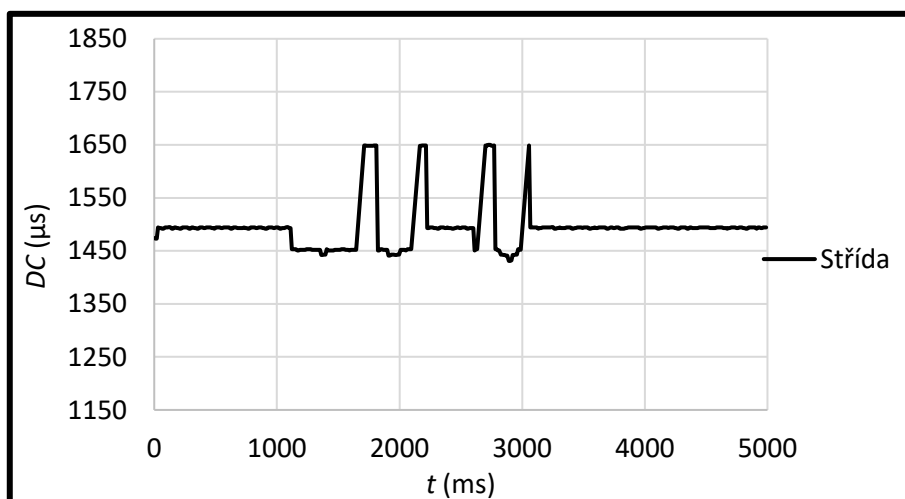
6.3 Testování platformy

Po vypracování hardwarové a softwarové struktury jsem se jal platformu testovat. V první řadě je vhodné zmínit, že testování probíhalo za podmínek stejných, jako prvotní měření závislosti rychlosti na hodnotě servosignálu. Měření se tak opět odehrávalo na asfaltové cestě s mírným sklonem, směrem do kopce. Naměřené hodnoty byly poté exportovány jako textové soubory z SD karty do počítače, importovány do Excelu a následně zpracovány. Tabulky nejsou v textu uvedeny, jelikož jsou příliš rozsáhlé.

6.3.1 Jízdní stav 1, manévr plyn-brzda

Natočení kol

Manévr plyn-brzda je specifický v tom, že při zatáčení dochází maximálně ke korekci jízdní stopy pomocí gyroskopické stabilizace. Model tedy nezatáčí a je možné vyhodnotit také přesnost, s jakou dochází ke korekci pohybu. První měřenou veličinou, kterou jsem se zabýval je tedy úhel natočení kol. Celková délka testu plyn-brzda je před programovaná a trvá $t = 5$ s.



Obrázek 46 Střída servosignálu generovaného na vstup servomotoru v závislosti čase testu plyn-brzda.

Jednotka ve skutečnosti měří délku pulzu (Duty Cycle), signálu generovaného na vstup servomotoru. Je tedy nutné její přepočtení na příslušné jednotky a hodnoty. Vzhledem ke skutečnosti, že servomotor je s koly přímo propojen táhly řízení a platí přímá úměra, připadá v úvahu přepočtení na jiný rozsah, tak zvané mapování. Pro to je však nutné znát rozsah natáčení kol modelu. Pomocí experimentálního měření pomocí úhloměru, kdy hlavním předpokladem je držet se jednoho styčného bodu na ose otáčení. Maximální rozsah natočení kol, tedy z hlediska funkce mapování výstupního signálu, jsem určil jako:

$$\beta = \pm 15^\circ \quad (6.4)$$

kde: β – úhel natočení kol ($^\circ$).

Druhý rozsah, který je třeba znát k přepočtu, představuje vstupní rozsah. Ten v tomto případě představuje přímo střidu signálu, která se pohybuje v maximálním rozsahu:

$$DC = 1150 \div 1850 \mu s \quad (6.5)$$

kde: DC – Duty Cycle, střída signálu (μs).

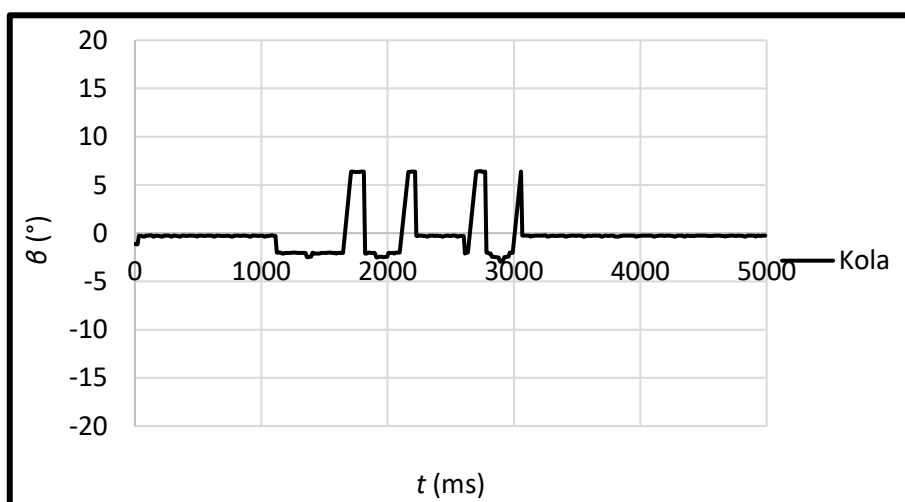
Přepočet na jiný rozsah je poté poměrně jednoduchý. Základní vzorec mapovací funkce je:

$$y = \frac{(x - IN_{MIN}) \cdot (OUT_{MAX} - OUT_{MIN})}{IN_{MAX} - IN_{MIN}} + OUT_{MIN} (-) \quad (6.6)$$

kde: y – výstupní proměnná (-), x – vstupní proměnná (-), IN_{MIN} – minimální hodnota rozsahu vstupní veličiny (-), OUT_{MAX} – maximální hodnota rozsahu výstupní veličiny (-), OUT_{MIN} – minimální hodnota rozsahu výstupní veličiny (-), IN_{MAX} – maximální hodnota rozsahu vstupní veličiny (-).

Konkrétní hodnoty zde nejsou opět z důvodu množství hodnot uvedeny. Jednotlivé hodnoty střídý však byly dosazeny do vzorce:

$$y = \frac{(x - 1150) \cdot (15 - (-15))}{1850 - 1150} + (-15) \quad (6.7)$$

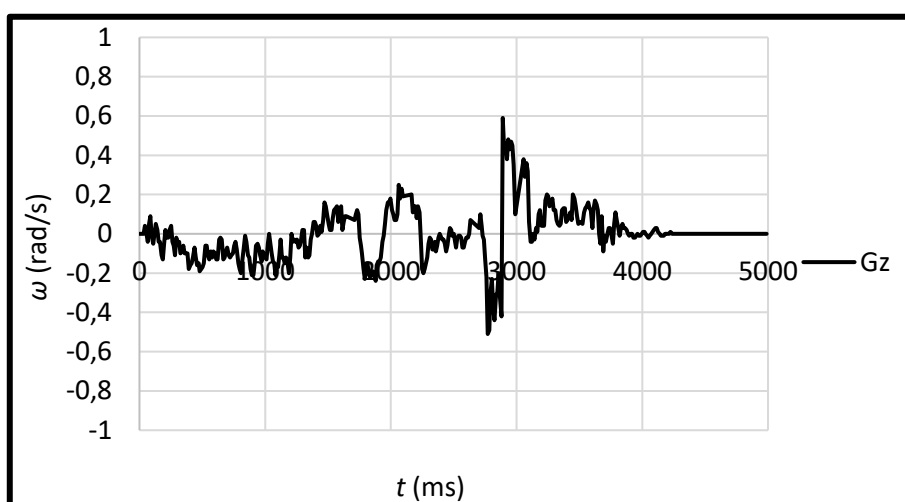


Obrázek 47 Úhel natočení kol v závislosti na čase testu plyn-brzda.

Takto přepočtené hodnoty byly vyneseny do grafu, který vidíme na obrázku 47. Můžeme si povšimnout, že průběh je naprosto stejný jako průběh střídý v čase na obrázku 47. To je logické vzhledem k charakteru přepočtu. Konkrétní změny v natočení ovšem neodpovídají přesně natočení kol. To je způsobeno z důvodu tuhosti konstrukce řízení, kdy nedochází vždy k navrácení do středové pozice. Samotné změny v úhlu natočení, spíše je vhodnější hovořit o střídě, jsou způsobeny korekcí kol do středové pozice, kterou jsem zavedl do zdrojového kódu gyroskopické stabilizace. Měření úhlu natočení kol by tak bylo vhodné realizovat trochu jiným způsobem, který bude počítat také s tuhostí konstrukce řízení.

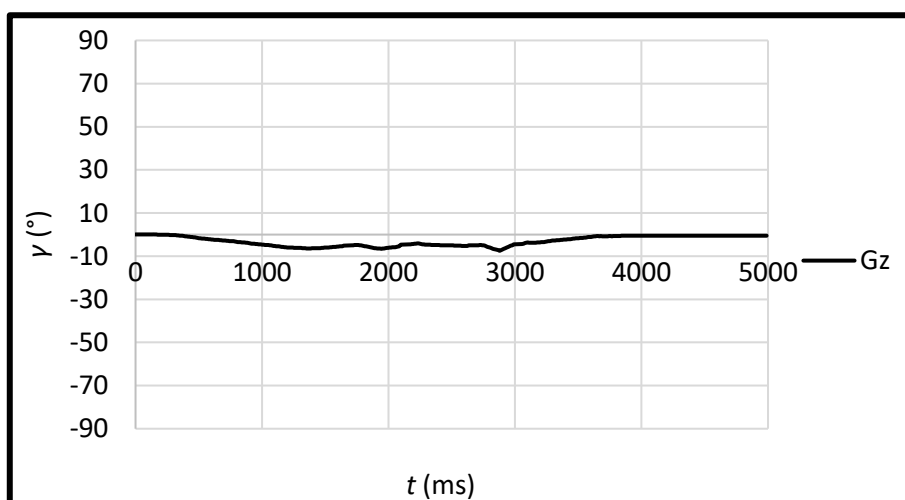
Natočení automobilu

K vyhodnocení natočení automobilu jsem použil samotný gyroskop. Způsob zpracování dat jsem zvolil stejným způsobem jako v případě gyroskopické stabilizace, je tak možné vyhodnotit její funkci. Gyroskop samozřejmě měří úhlovou rychlost ω a je tak nutné ji upravit na úhel natočení γ . Přepočet je uveden na obrázku 31 a je naprosto stejný jako výpočet v kódu mikroprocesoru.



Obrázek 48 Úhlová rychlost v závislosti na čase testu plyn-brzda.

Průběh naměřené úhlové rychlosti při testu plyn-brzda vidíme na obrázku 48. Můžeme si povšimnout, že okolo času $t = 3$ s došlo k poměrně velkému výkyvu stáčení. To je způsobeno přejetím nerovnosti v podobě přechodu dvou asfaltových ploch, které způsobilo lehké vytočení modelu při jízdě.

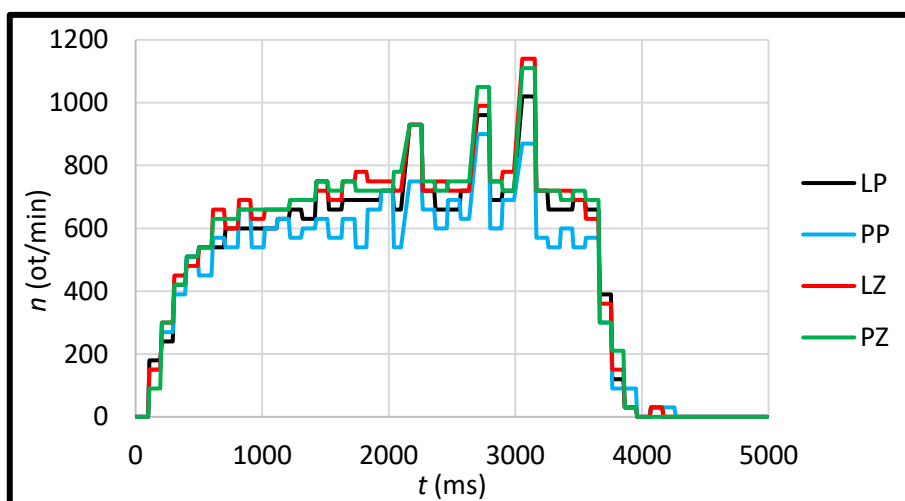


Obrázek 49 Úhel natočení modelu v závislosti na čase testu plyn-brzda.

Po přepočtu úhlové rychlosti na směrový úhel natočení γ , jehož průběh vidíme na obrázku 49, mohu konstatovat, že gyroskopická stabilizace odvádí svou práci správně. Model jel naprosto rovně až do času $t = 0,5$ s, kdy došlo vychýlení z kurzu. Poté při jízdě docházelo téměř po celou dobu k lehkému zatáčení modelu, které však byla jednotka schopna celkem spolehlivě kompenzovat a po přejetí zmíněné nerovnosti v čase $t = 3$ s, došlo dokonce k téměř úplnému vyrovnaní modelu. V čase $t = 3,5$ s došlo k požadavku brzdění pomocí programu a model poté plně zastavil. Můžeme si také povšimnout, že implementace pracuje s maximálním úhlem natočení $\gamma = \pm 90^\circ$.

Otáčky kol

Výsledné naměřené hodnoty otáček kol není potřeba nijak upravovat. Jejich výpočet je realizován přímo v kódu mikroprocesoru s uvažováním 20 pulzů na otáčku při vzorkovací periodě 100 ms. Naměřené hodnoty vidíme na obrázku 50. V zásadě se dá říci, že se jedná o přechodovou charakteristiku. To znamená, že jsem schopen vypočítat také průměrnou hodnotu rychlosti při dopředné jízdě. Stačí znát otáčky a průměr kola. Opět si můžeme povšimnout změnou měřených hodnot při přejezdu nerovnosti v čase $t = 3$ s. Odchylek je zde však více, pravděpodobně jsou způsobeny nepřesnostmi měření.



Obrázek 50 Otáčky jednotlivých kol v závislosti na čase testu plyn-brzda.

Průměr kola byl určen posuvným měřidlem a činí:

$$D = 60 \text{ mm} \quad (6.8)$$

kde: D – vnější průměr pneumatiky (mm).

Ustálená hodnota otáček se pohybuje okolo:

$$n = 720 \text{ ot/min} \quad (6.9)$$

kde: n – otáčky kola (ot/min).

Výpočet rychlosti z těchto parametrů je dán rovnicí:

$$v = n \cdot D \cdot \pi \cdot \frac{60}{1000} \text{ (km/h)} \quad (6.10)$$

kde: v – rychlost jízdy modelu (km/h).

Výsledná hodnota ustálené rychlosti podle (6.10) tedy činí:

$$v = 720 \cdot 0,060 \cdot \pi \cdot \frac{60}{1000} \text{ km/h} \quad (6.11)$$

$$v = 8,143 \text{ km/h} \quad (6.12)$$

Dle výpočtu rychlosti pohybu tedy mohu říci, že žádaná rychlost pohybu určená v prvotním měření závislosti hodnoty servosignálu na rychlosti pohybu, odpovídá daným hodnotám až překvapivě přesně. Očekával jsem mnohokrát větší chybu způsobenou vzorkováním nebo nepřesností senzorů.

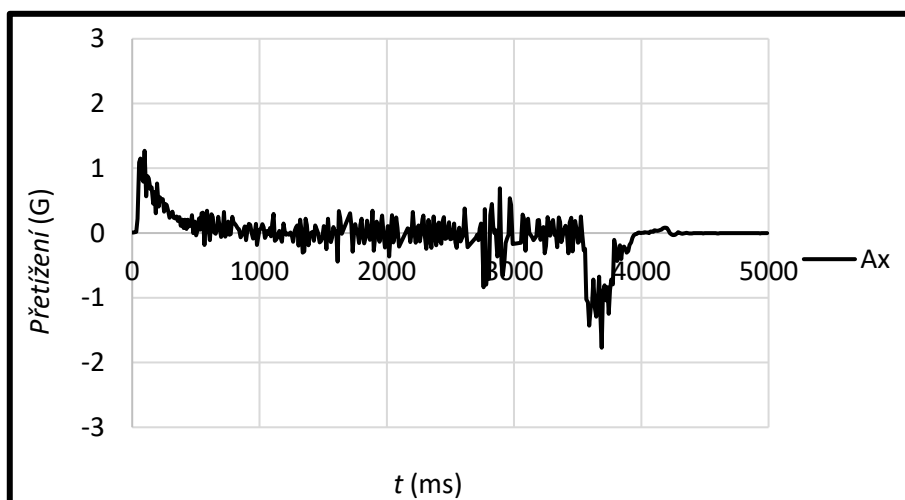
Přetížení

Měření přetížení zajistil akcelerometr v ose x , tedy v ose podélné směru jízdy. Výsledné hodnoty jsou však rovny zrychlení v dané ose a je potřeba je upravit na přetížení v podobě podílu gravitačního zrychlení. Není tedy nutné zde uvádět výstupní data z akcelerometru, jelikož přetížení je pouze jejich ponížená obdoba.

Výpočet přetížení bylo provedeno dle vztahu:

$$G = \frac{a}{g} = \frac{a}{9,807} \text{ (-)} \quad (6.13)$$

kde: G – přetížení (-), a – zrychlení (m/s^2), g – gravitační zrychlení (m/s^2).

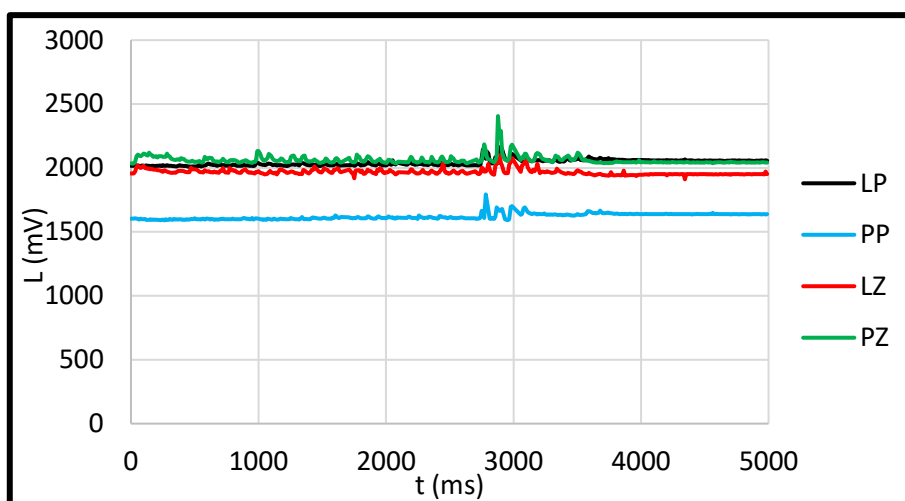


Obrázek 51 Přetížení působící na automobil v závislosti na čase testu plyn-brzda.

Výslednou závislost přetížení působícího na automobil v čase vidíme na obrázku 51. Ihned po zahájení testu si můžeme všimnout, že při rozjezdu působilo na automobil přetížení přibližně odpovídající $G = 1,1$, které se dle očekávání postupně vytratilo. V grafu přetížení ovšem není příliš dobře viditelné přejetí nerovnosti v čase $t = 3$ s. To dává smysl, jelikož akcelerometr měří zrychlení v ose, v tomto případě v ose x . I když zde není vykreslena charakteristika, dovoluji si zmínit se, že přejetí nerovnosti je dle očekávání velmi dobře viditelné v ose z a překvapivě také v ose y . V čase $t = 3,5$ s je ovšem velice zřetelně vidět začátek brzdění, kdy působí maximální přetížení $G = -1,4$, až do úplného zastavení přibližně v čase $t = 4$ s. Vyšší hodnotu (špičku) přetížení při brzdění hodnotím jako statistickou chybu snímače.

Zdvih tlumičů

Posledním měřeným parametrem je zdvih tlumičů. Zde je spíše vhodné hovořit o průběhu délky při kompresi. Veličinou měřenou na ohybových senzorech je výstupní napětí, jehož průběh vidíme na obrázku 52. I po kalibraci všech tenzometrů na přibližně stejnou hodnotu výstupního napětí je nepřehlédnutelné, že jeden ze snímačů definuje úroveň napětí asi o 0,5 V nižší než ostatní. Jedná se o prvek, který jsem v průběhu práce nahrazoval za stejný kus o stejných parametrech. Rozdíl je tak pravděpodobně způsoben opotřebením ostatních senzorů nebo odlišnostech způsobených při výrobě. Dále je zřetelně vidět přejetí nerovnosti v čase $t = 3$ s, ale také stlačení neboli pro pružení zadních tlumičů při rozjezdu.



Obrázek 52 Napětí ohybových senzorů v závislosti na čase testu plyn-brzda.

Vzhledem k tomu, že se opět jedná o jednotnou, propojenou strukturu, kde platí přímá úměra, rozhodl jsem se pro normalizaci a převedení napětí do délkových jednotek opět využít mapovací funkci. Pro přepočet jsem tedy opět použil funkci v rovnici (6.6). Je samozřejmě opět nutné znát rozsahy vstupní a výstupní veličiny. Pro ohybové senzory platí, že při ohybu generují na analogový vstup arduina vyšší napětí než v rovném stavu. Experimentálně jsem tedy změřil rozsah jednotlivých tenzometrů odpovídající maximálnímu natažení a stlačení tlumiče.

Rozsah vstupních napětí jednotlivých ohybových senzorů:

$$U_{LP} = 1980 \div 2180 \text{ mV} \quad (6.14)$$

$$U_{PP} = 1560 \div 1810 \text{ mV} \quad (6.15)$$

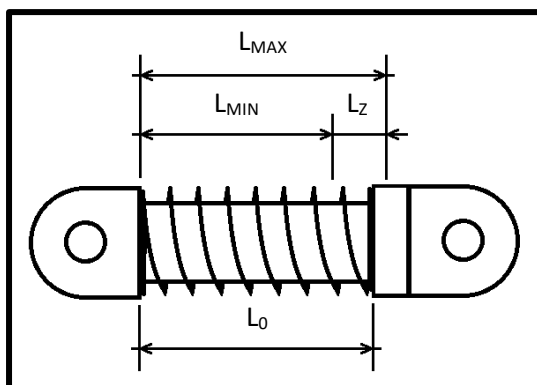
$$U_{LZ} = 1940 \div 2160 \text{ mV} \quad (6.16)$$

$$U_{PZ} = 2040 \div 2320 \text{ mV} \quad (6.17)$$

kde: U_{LP} – napětí levého předního tenzometru (mV), U_{PP} – napětí pravého předního tenzometru (mV), U_{LZ} – napětí levého zadního tenzometru (mV), U_{PZ} – napětí pravého zadního tenzometru (mV).

Jako výstupní rozsah jsem se rozhodl uvažovat rozsah délky tlumičů, jehož hodnoty jsem určil pomocí měření posuvným měřidlem při maximální kompresi a maximálním prodloužení. Zdvih všech tlumi-

čů je stejný, jelikož se jedná o stejné díly a dle zjištění není závislý na světlé výšce automobilu, která je vepředu i vzadu rozdílná. Jen pro zajímavost uvádím, že světlá výška v přední části podvozku činí 7 mm v klidu a v zadní části činí 11,5 mm. Náskres tlumiče a uvažované parametry vidíme na obrázku 53.



Obrázek 53 Náskres tlumiče.

Typická délka tlumičů v klidové pozici je rovna:

$$L_0 = 26 \text{ mm} \quad (6.18)$$

A rozsah jejich pohybu (v zásadě se jedná o délku pružiny) se pohybuje v rozmezí:

$$L = 21 \div 28 \text{ mm} \quad (6.19)$$

Z toho tedy vyplývá, že skutečná hodnota zdvihu je rovna:

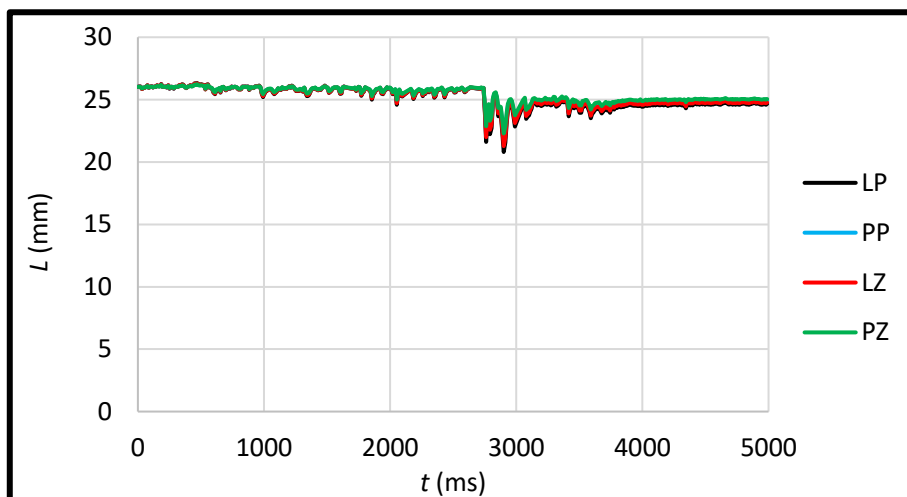
$$L_Z = 28 - 21 = 7 \text{ mm} \quad (6.20)$$

Výsledný vztah mapovací funkce pro hodnoty levého předního tlumiče odpovídá:

$$y = - \left(\frac{(x - U_{LP_{MIN}}) \cdot (L_{MAX} - (L_{MIN}))}{U_{LP_{MAX}} - U_{LP_{MIN}}} + (L_{MIN}) \right) + \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i + L_0 \quad (6.21)$$

$$y = - \left(\frac{(x - 1980) \cdot (28 - (21))}{2180 - 1980} + (21) \right) + \frac{1}{10} \cdot \sum_{i=1}^{10} y_i + 26 \quad (6.22)$$

Analogicky lze určit vztahy ostatních tenzometrů a jim odpovídajících tlumičů. Pro normalizaci směrem k nule jsem od každé hodnoty souboru odečetl průměrnou hodnotu prvních deseti prvků výsledného souboru. Pro posunutí do rozsahu pohybu tlumičů jsem následně přičetl typickou délku pružiny tlumiče v klidu. Výslednou závislost délky jednotlivých tlumičů, respektive prodloužení pružin, na čase vidíme na obrázku 54. Můžeme si povšimnout, že graf vykazuje stejné skutečnosti jako závislost napětí na obrázku 52. Při přejetí nerovnosti došlo k propružení levého předního tlumiče o prakticky maximální hodnotu zdvihu $L_Z = 7 \text{ mm}$, což značí, že došlo k doteku šasí s vozovkou. Dále je dobře viditelné, že při brzdění v čase $t = 3,5 \text{ s}$ dochází opět ke kompresi tlumičů. Po přejetí nerovnosti a zastavení je zjevné, že se tlumiče nevrátí do původní klidové pozice, nýbrž zůstanou částečně stlačené přibližně o 1 mm. Tohle chování je ověřitelné také při ručním stlačení tlumičů v případě, že se automobil nepohybuje.



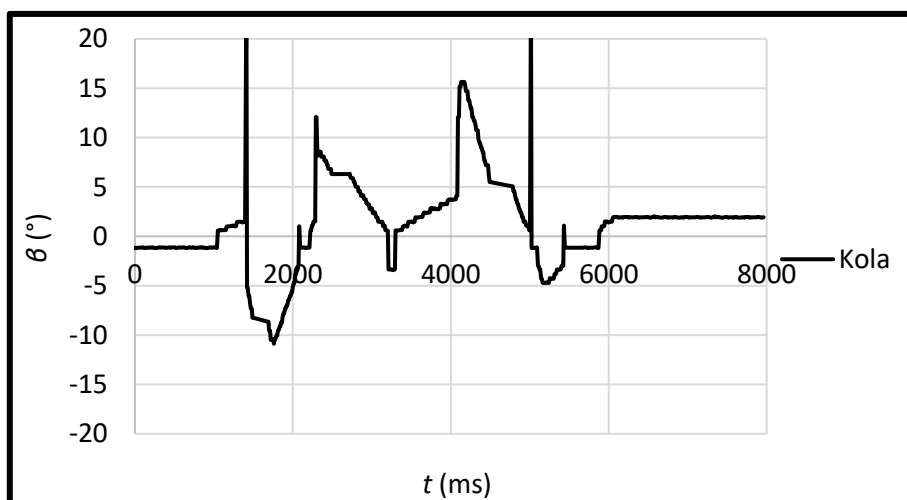
Obrázek 54 Stlačení jednotlivých tlumičů v závislosti na čase testu plyn-brzda.

6.3.2 Jízdní stav 2, manévr losí test

V případě losího testu je odlišností, že je potřeba manipulovat se servomotorem. To vnáší do měřící smyčky zpoždění, které je zapotřebí do kódu implementovat pro správné přestavení serva. Pro měření je to samozřejmě nežádoucí stav. Proto jsem se rozhodl při měření vyřadit gyroskopickou stabilizaci, aby nedocházelo k dalšímu zkreslení měřených hodnot. Vzhledem k tomu, že postup získání veškerých dat byl zmíněn již v předchozí kapitole při vyhodnocení manévru plyn-brzda, jsou v této kapitole uvedeny pouze výsledné vypočtené charakteristiky. Celková délka testu je opět předprogramovaná a trvá $t = 8$ s.

Natočení kol

Při pohledu na průběh natočení kol na obrázku 55 vidíme, že po rozjezdu dochází přibližně v čase $t = 1$ s k určité nepředpokládané změně úrovně výchozí polohy. Nejsem schopen zdůvodnit, čím je to způsobeno. Záporné hodnoty představují natočení kol vlevo, kladné hodnoty natočení vpravo. Poté v čase $t = 1,5$ s dochází k natočení kol vlevo. Na chvíli se kola srovnají a následně v čase $t = 2,5$ s jsou kola natočena vpravo pro kompenzaci levotočivé zatáčky, což zajišťuje rovnou jízdu ve vedlejším jízdním pruhu. Poté opět dochází ke srovnání kol a v čase $t = 4,5$ s následuje opětovné natočení kol vpravo a následně v čase $t = 5,5$ s naopak vlevo, které zajistilo navrácení do původního pruhu.

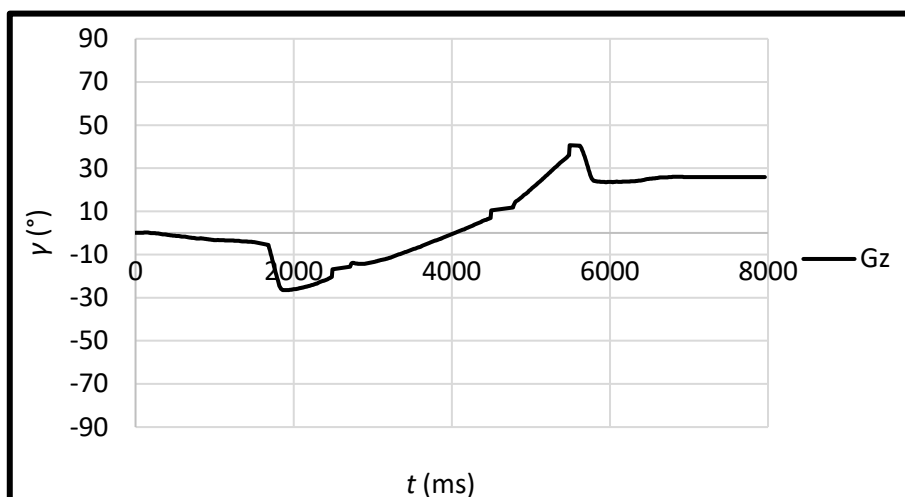


Obrázek 55 Úhel natočení kol v závislosti na čase losího testu.

Mohu tedy konstatovat, že ovládání natočení kol v tomto případě odpovídá předpokladu. V kontrastu k testu plyn-brzda tedy opravdu dochází k natočení kol při jízdě. Hodnoty natočení se pohybují v rozsahu $\pm 15^\circ$. Bohužel takovéto řešení vykazuje také nevýhody. Můžeme si všimnout, že při přestavování serva v časech $t = 1,4$ s a $t = 5$ s dochází k obrovským špičkám. Jsou s největší pravděpodobností způsobeny zapisováním hodnot servosignálu na vstup servomotoru, který se není schopen se změnou vyrovnat a v systému jsou poté generovány atypické hodnoty PWM. Pravděpodobně se jedná o součet délek více pulzů nebo chybu podobného ražení.

Natočení automobilu

Pomocí natočení automobilu měřeného gyroskopem je oproti předchozímu manévru možné určit směrové úhly natočení okolo osy z , o který se automobil vybočí při zatáčení v testu. Opět platí, že záporná hodnota úhlu představuje zatočení vlevo a kladná hodnota zatočení vpravo. Na obrázku 56 tak vidíme, že parametry natočení kol a natočení modelu si ve směru natočení odpovídají. Po vybočení do jiného jízdního pruhu dochází v čase $t = 1,5$ s k postupnému natočení modelu téměř o -30° . Následná korekce pro rovnou jízdu zajišťuje postupné natočení modelu do směru paralelně ke startovní pozici v čase $t = 4$ s. Od této doby model zase vybočuje z přímé jízdy až do návratu do původního jízdního pruhu v čase $t = 5,5$ s. Můžeme ovšem vidět, že systém má stále mouchy způsobené nepřesností ovládání servomotoru a po zastavení je model natočen o 30° vpravo vůči startovní pozici.



Obrázek 56 Úhel natočení modelu v závislosti na čase losího testu.

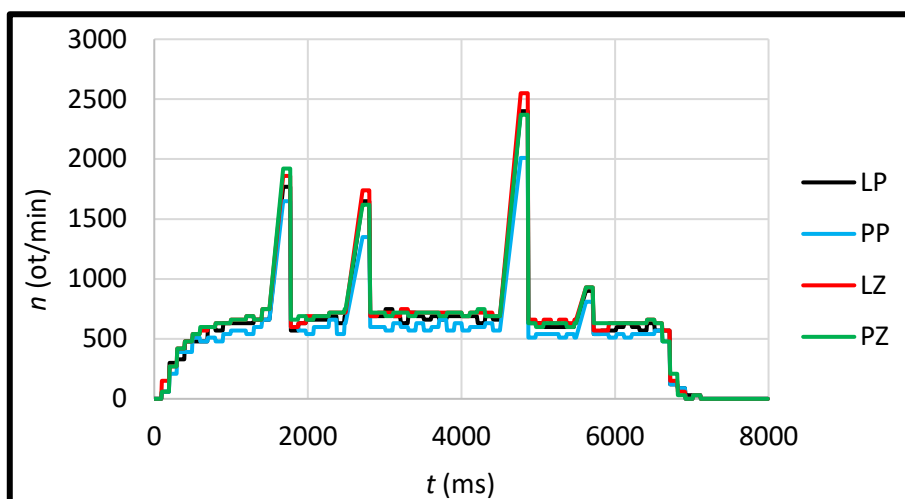
Otáčky kol

Otáčky kol jsou opět jednoduché k vyhodnocení. Na obrázku 57 zřetelně vidíme, že v dobách přestavování servomotoru není hodnota otáček správně zaznamenána a arduino ji vyhodnocuje chybně. To má za následek obrovské špičky, které by bylo možné vyloučit jako chybu metody měření. Na druhou stranu vidíme, že v mezidobí při ustálené jízdě, se otáčky jednotlivých kol opět pohybují v podobné hladině, jako při testu plyn-brzda, a jejich ustálená hodnota činí přibližně:

$$n = 700 \text{ ot/min} \quad (6.23)$$

Výsledná hodnota ustálené rychlosti podle (6.10) je podobná a je rovna:

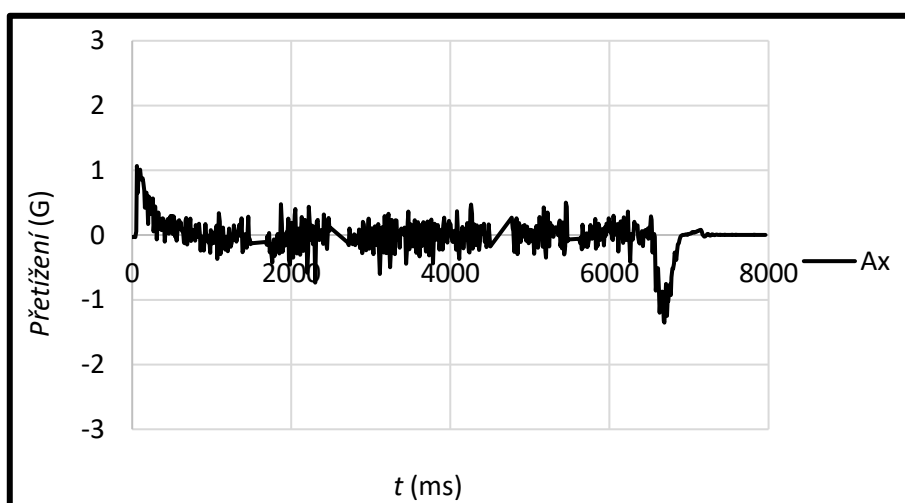
$$v = 700 \cdot 0,060 \cdot \pi \cdot \frac{60}{1000} = 7,917 \text{ km/h} \quad (6.24)$$



Obrázek 57 Otáčky jednotlivých kol v závislosti na čase losího testu.

Přetížení

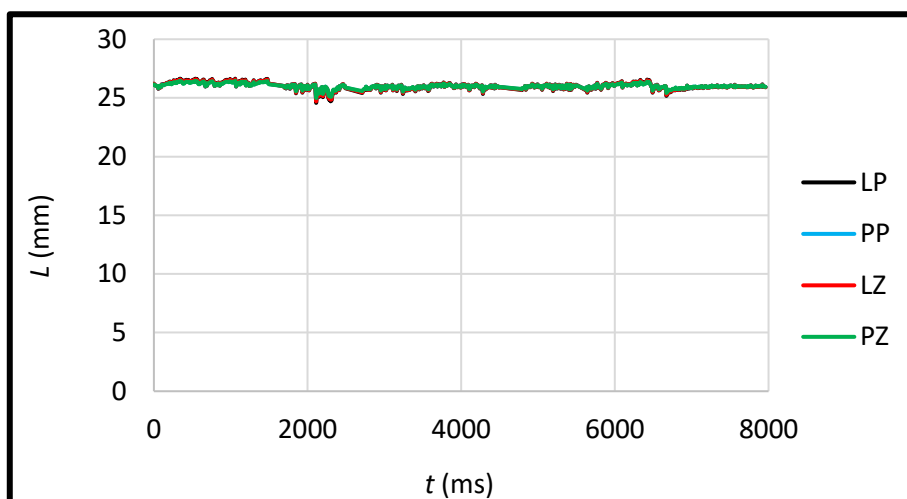
Z průběhu přetížení na obrázku 58 vyplývají stejné skutečnosti, jako testu plyn-brzda. To je logické, jelikož je použita stejná hodnota vstupního servosignálu pro ovládání rychlosti modelu. V praxi to tedy znamená, že při rozjezdu na automobil působilo podobné přetížení $G = 1,05$. Při brzdění v čase $t = 6,5$ s se opakuje stejná situace a přetížení je rovno $G = -1,4$. V časech $t = 1,5$ s, $t = 2,5$ s, $t = 4,5$ s a $t = 5,5$ s jsou opět velmi patrné chyby měření způsobené přestavováním servomotoru.



Obrázek 58 Přetížení působící na automobil v závislosti na čase losího testu.

Zdvih tlumičů

Z průběhů délky stlačení tlumičů na obrázku 59 je patrné, že se zdvih při testu pohyboval prakticky na konstantní úrovni. Primárně to znamená, že při tomto testu nebyly přejety žádné předpokládané nerovnosti. Jediné mírně viditelné kompresi tlumičů došlo v čase $t = 2,2$ s. Rovněž je opět viditelné malé odlehčení tlumičů při rozjezdu automobilu, a naopak také jejich komprese při brzdění v čase $t = 6,5$ s. Bohužel je mi záhadou, proč v obou případech došlo ke kompresi a odlehčení všech čtyř tlumičů najednou. Předpokladem je, že při rozjezdu by měly být zadní tlumiče stlačeny a přední odlehčeny. Při brzdění je předpoklad přesně opačný. Vzhledem ke stejnému, a poměrně dobře vypovídajícímu, způsobu vyhodnocení jako při testu plyn-brzda předpokládám, že nedošlo k chybě ve zpracování dat. Z tohoto měření mohu konstatovat vysokou tuhost podvozku.



Obrázek 59 Stlačení jednotlivých tlumičů v závislosti na čase losího testu.

6.4 Porovnání s matematickým modelem

Při porovnání s matematickým jsem se po konzultaci s vedoucím práce zaměřil na výpočet parametrů uvedených v teoretickém popisu v kapitole Hodnocení dynamiky jízdy. Prvním poznatkem je, že ve skutečnosti neznám dráhu, kterou model urazil. Zním pouze dobu trvání obou jízdních testů, která je naprogramována v řídicí jednotce. Vzdálenost ujetou při obou jízdních testech počítám stejným způsobem, i přes to, že její přesnou hodnotu tímto způsobem nejsem určit. Ve skutečnosti se jedná o kombinaci zrychleného, ustáleného a zpomaleného pohybu. Jedná se spíše o hrubý, ale dle mého názoru dostatečný odhad vzdálenosti.

Výpočet ujeté dráhy

Doba trvání manévru plyn-brzda:

$$t_1 = 5 \text{ s} \quad (6.25)$$

Doba trvání manévru losího testu:

$$t_1 = 8 \text{ s} \quad (6.26)$$

Dráhu tak mohu vypočítat podle rovnice:

$$s = v \cdot t \quad (6.27)$$

Za rychlost dosazuji rychlost v rovnici (6.12) vypočtenou z naměřených hodnot. Celková ujetá vzdálenost při testu plyn-brzda činí:

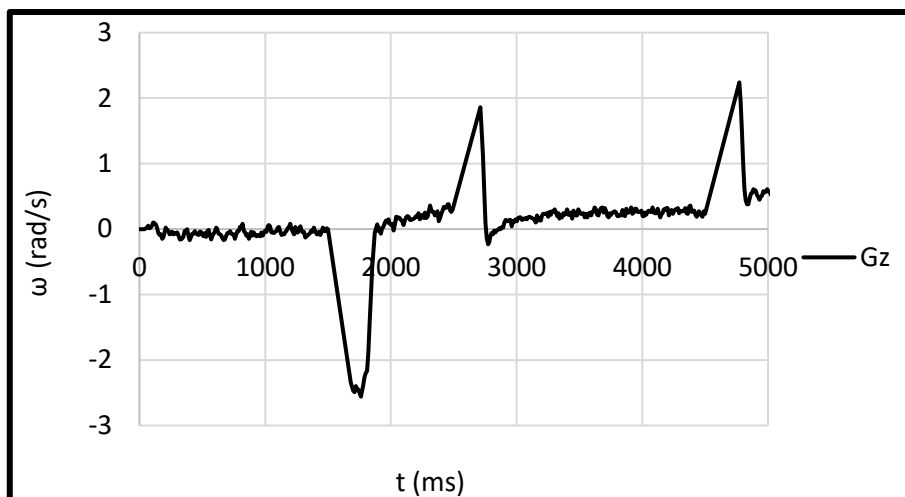
$$s_1 = \frac{8}{3,6} \cdot 5 = 11,111 \text{ m} \quad (6.28)$$

Celková ujetá vzdálenost při losím testu činí:

$$s_2 = \frac{8}{3,6} \cdot 8 = 17,776 \text{ m} \quad (6.29)$$

Výpočet dostředivé a odstředivé síly

Dostředivou sílu je možné zjistit pouze pro otáčivý pohyb, v případě této práce tedy uvažuji výpočet pro manévry losího testu, jelikož manévry plyn brzda je uvažován jako přímočarý pohyb. Sílu vyšetřuji na základě vztahu (4.7). V první řadě je však nutné určit dostředivé zrychlení. Na průběhu závislosti úhlové rychlosti v závislosti na čase losího testu na obrázku 60 vidíme, že maximální hodnoty úhlové rychlosti automobil dosáhl při vybočení z jízdního pruhu.



Obrázek 60 Směrová úhlová rychlost v závislosti na čase losího testu.

Maximální dosažená úhlová rychlost:

$$\omega = 2,48 \text{ rad/s} \quad (6.30)$$

Uvažuji, že rychlost pohybu po kružnici odpovídá rychlosti jízdy automobilu. Dostředivé zrychlení je poté na základě vztahu (4.8) rovno:

$$a_d = v \cdot \omega = \frac{8}{3,6} \cdot 2,48 = 5,511 \text{ m/s}^2 \quad (6.31)$$

Nyní mohu vypočítat hodnotu dostředivé síly. Uvažuji hmotnost automobilu $m = 2,250 \text{ kg}$:

$$F_d = m \cdot a_d = 2,250 \cdot 5,511 = 12,4 \text{ N} \quad (6.32)$$

Odstředivá síla působící na automobil má stejnou velikost, pouze s opačným znaménkem:

$$F_o = -F_d = -12,4 \text{ N} \quad (6.33)$$

Valivý odpor

Valivý odpor určuji podle vztahu (4.12) za pomoci úhlu stoupání vozovky vypočteného v (6.2). Součinitel valivého odporu uvažuji pro suchý asfalt a volím podle tabulce 6 o hodnotě:

$$f = 0,01 \quad (6.34)$$

Valivý odpor je roven:

$$O_f = f \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) = 0,01 \cdot 2,250 \cdot 9,807 \cdot \cos(2,862) = 0,221 \text{ N} \quad (6.35)$$

Vzdušný odpor

Vzdušný odpor určí podle vztahu (4.14). Jelikož bylo při měření prakticky bezvětří, pro zjednodušení uvažují náporovou rychlost větru stejnou jako rychlost pohybu vozu při manévrech:

$$v_r = \frac{8}{3,6} = 2,222 \text{ m/s} \quad (6.36)$$

Čelní plochu karoserie jsem určil měřením čelní strany automobilu a přepočtením na obsah. Vynechal jsem ovšem zrcátka, jelikož na modelu nejsou osazena. Čelní plocha činí přibližně:

$$S_x = 19,850 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (6.37)$$

Součinitel odporu vzduchu odhaduji a měrná hmotnost vzduchu představuje konstantu:

$$c_x = 0,08 \text{ (-)} \quad (6.38)$$

$$\rho = 1,293 \text{ kg/m}^3 \quad (6.39)$$

Výsledný vzdušný odpor je roven:

$$O_v = c_x \frac{\rho}{2} S_x \cdot v_r^2 = 0,08 \cdot \frac{1,293}{2} \cdot 19,850 \cdot 10^{-3} \cdot 2,222 = 2,281 \cdot 10^{-3} \text{ N} \quad (6.40)$$

Odpor stoupání

Odpor stoupání určí dle rovnic (4.20) a (6.1). Je roven:

$$O_s = m \cdot g \cdot s = 2,250 \cdot 9,807 \cdot 0,05 = 1,103 \text{ N} \quad (6.41)$$

Celkový jízdní odpor

Při výpočtu celkového jízdního odporu podle (4.21) zanedbávám odpor zrychlení. Celková hodnota odporu je rovna:

$$F_K = O_f + O_v + O_s = 0,221 + 2,281 \cdot 10^{-3} + 1,103 = 1,327 \text{ N} \quad (6.42)$$

Shrnutí

V této kapitole byla provedena realizace autonomních jízdních manévřů. Realizace spočívá v odpojení řídicí elektroniky modelu pomocí relátek a následné převzetí ovládání pomocí mikroprocesoru. Jako dálkové ovládání nebylo vyhovující použít stávající elektroniku vysílačky a byla tak realizována komunikace dvou ESP8266 modulů typu server-client. Elektronika vysílačky byla doplněna o modul klienta, s uložením elektroniky přímo na vysílačku do 3D vytištěné krabičky. Dále v této kapitole bylo provedeno testování platformy s využitím autonomní realizace jízdních stavů a jejich měření. Nakonec se kapitola zabývala dopočtem parametrů souvisejících s hodnocením dynamiky jízdy.

7 Závěr

Tato diplomová práce pojednává o měřící jednotce autonomně prováděných jízdních stavů jako laboratorní studijní pomůcce. Práce se konkrétně zaměřuje na dva typy jízdních manévřů v podobě testu plyn-brzda a normovaného testu laickou veřejností známého jako losí test. Základní myšlenkou je částečně autonomní pohyb v případě před programovaných jízdních manévřů, ne však kompletně autonomní pohyb automobilu. V práci je popsána konstrukce podvozku RC modelu. Dále se teze zabývá řídicí deskou Arduino DUE, popisem senzory a jejich elektrickým zapojením. Parametry senzorů a schémata zapojení byly přehledně uvedeny v tabulkách a obrázcích v příslušných kapitolách.

V práci je proveden popis ovládání RC modelů z hlediska signálových veličin. RC soupravy spolu komunikují pomocí různých metod zahrnutých v tak zvaných komunikačních protokolech. V praxi nás použitý protokol moc trápit nemusí, ovlivnit jej stejně můžeme pouze nákupem jiné vysílačky specificky za účelem jiného protokolu. Vysílačka Flysky GT2B pracuje s protokolem AFDHS., jež představuje modifikaci protokolu FHSS. od společnosti Spectrum. Dále je také popsán princip ovládání motorů z hlediska PWM signálu generovaného přijímačem, ale také možnosti ovládání pomocí servosignálu arduina.

Teze popisuje také základní veličiny a možnosti pro hodnocení dynamiky jízdy automobilu. Pro zpracování jsou uvažovány dva jízdní manévry, měření brzdné dráhy a losí test. Oba jsou určitým způsobem implementovány do konečného řešení, kdy automobil autonomně provádí příslušný test. Taktéž je okrajově popsána problematika zapříčiněná jízdními odpory. Pro tuto práci nejsou vyloženy důležité, ale v praxi, případně i v matematickém modelu, bychom s nimi měli počítat, a proto je vhodné na ně upozornit.

Práce navíc okrajově popisuje možnosti přepracování modelu na nezávislý pohon každého kola samostatným motorem. Byly navrženy dva způsoby uchycení pohonných jednotek, jejichž zobrazení vidíme na obrázcích 21 a 24. Obě varianty mají svá pozitiva i negativa. Vzhledem k podobnosti umístění motorů s reálným umístěním v případě elektromobilů, se přikláním k první variantě, a sice umístění motorů na stejné ose jako kola. Prvotní návrh řešení modelovacím software Creo Parametric je vyobrazen na obrázku 23. Motory uvažované v návrhu vidíme na obrázku 22. Elektronicky obě možnosti pracují s použitím čtyř elektronických regulátorů otáček ovládaných pomocí servosignálu generovaného arduinem. Pro jízdu by bylo zapotřebí provést korekce z důvodu přetáčivosti nebo nedotáčivosti, které lze realizovat ve zdrojovém kódu arduina. Tímto tématem jsem se však dále nezabýval.

Dále byla provedena realizace autonomních jízdních manévřů. Realizovaná struktura spočívá v odpojení řídicí elektroniky modelu pomocí relé modulů a následné převzetí ovládání pomocí mikroprocesoru. Jako dálkové ovládání nebylo vyhovující použít stávající elektroniku vysílačky a byla proto realizována komunikace dvou ESP8266 modulů typu server-client. Elektronika vysílačky byla doplněna o modul klienta, s uložením elektroniky přímo na vysílačku do 3D vytištěné krabičky, kterou vidíme na obrázku 40.

V neposlední řadě bylo v práci provedeno testování platformy s využitím autonomní realizace jízdních stavů a jejich měření. Průběh natočení kol automobilu při testu plyn-brzda vidíme na obrázku 47 a průběh natočení automobilů měřený gyroskopem vidíme na obrázku 49. Při tomto testu byla zapojena také gyroskopická stabilizace, který byla v práci zpracována. Můžeme si tak povšimnout korekcí prove-

dených stabilizací v podobě změn úrovní servosignálu. Samotná stabilizace fungovala poměrně v pořádku, jelikož byla schopná směrový úhel natočení automobilu korigovat. Na obrázku 50 vidíme průběh otáček jednotlivých kol, jejichž hodnota se při jízdě pohybovala okolo $n = 720$ ot/min. Na obrázku 51 si můžeme povšimnout průběhu změřeného zrychlení v podélné ose x pohybu autíčka, které je normalizováno přepočtem na přetížení. Maximální hodnota přetížení působí při brzdění o hodnotě $G = 1,4$. Na obrázku 54 se nachází průběh zdvihu tlumičů vyjádřený jako délka pružiny při jízdě. Rozsah jejího stlačení byl zvolen měřením fyzických dispozicí modelu a pohybuje se v úrovních $L = 21 \div 28$ mm. Při testu došlo v čase $t = 3$ s k průjezdu přes nerovnost, což je na charakteristice velmi dobře vidět jako propnutí o 7 mm. Došlo tak k doteku vany podvozku s asfaltem.

Pro jízdní manévry testu losího platí stejné parametry a podobné průběhy, jen s jistými rozdíly. Hlavní odlišností je, že je ovládáno také zatáčení podvozku. To ovšem negativně ovlivňuje měření, protože servomotor vyžaduje implementaci určitých časových prodlev pro správné přestavování. Při tomto manévru jsem se proto rozhodl nepoužít ani gyroskopickou stabilizaci, aby bylo měření co možná nejméně ovlivněno. Tyto chyby způsobené principem měření můžeme dobře vidět například na obrázku 57, který vykazuje velkými špičkami otáček při přestavování serva, a tím způsobené prodlevy v měření. Na obrázku 56 si můžeme všimnout, že směrový úhel natočení automobilu je po skončení testu roven $\gamma = 30^\circ$. Z toho vyplývá, že gyroskopická stabilizace byla skutečně vyřazena. Otáčky jednotlivých kol se opět pohybovaly v podobné hladině okolo $n = 720$ ot/min. V obou případech se tak model pohyboval přibližně rychlostí $v = 8$ km/h, která byla zvolena na základě měření řídicího úhlu servosignálu. Naměřené hodnoty můžeme vidět v tabulce 9 a vyneseny jsou v charakteristice na obrázku 34. Nakonec se práce zabývá dopočtem parametrů souvisejících s hodnocením dynamiky jízdy.

Jak vyplývá z popisu měření, pro budoucí řešení by bylo vhodné exportovat řízení servomotoru na jinou jednotku. Jako vhodný kandidát se v navrženém systému jeví server jednotka s mikroprocesorem ESP8266 tvořená modulem Wemos D1 mini. Disponuje stejně jako Arduino DUE hned několika PWM výstupy a kompatibilitou s knihovnou *servo.h*. Navrhuji tedy přenést řízení servomotoru a gyroskopickou stabilizaci právě na jednotku Wemos, která stejně v době měření nepracuje a její výkon by mohl být využit k tomuto účelu. Pravděpodobně by měla stačit jednoduchá modifikace zapojení, kdy by Arduino DUE v průběhu jízdního manévru vyslalo požadavek na zatočení do jednotky Wemos. Mělo by tak dojít k úplné eliminaci hluchých míst při měření způsobených přestavováním servomotoru, a navíc odlehčení mikroprocesoru Arduina DUE. Další možnou úpravou by mohlo představovat přepracování modelu na nezávislý pohon kol, který je v této práci částečně rozpracován. Jednak by se tímto způsobem zlepšilo rozložení váhy podvozku, a také by se svým uspořádáním více přiblížil skutečným elektromobilům.

Použitá literatura

1. CHYTIL, Tomáš. *RC model jako testovací platforma jízdních stavů*. [cit. 2020-10-19]. Diplomová práce VŠB TUO, 2020,
2. Studentcar. [online], *Oficiální webové stránky projektu Studentcar*. [cit. 2020-10-19]. VŠB TUO – Katedra materiálů a technologií pro automobily. Dostupné také z: <http://www.studentcar.cz>,
3. RC auta - rádiové modely aut. [online], *Podvozek Tamiya TT-01E*. [cit. 2020-10-19]. Dostupné také z: <http://www.rcauta.cz>,
4. VLK, František. *Dynamika motorových vozidel: jízdní odpory, hnací charakteristika, brzdění, odpružení, řiditelnost, ovladatelnost, stabilita*. [cit. 2020-10-20]. Brno: F. Vlk, 2000. ISBN 80-238-5273-6,
5. SKYRC. [online], *SkyRC Cheetah 1/10 60A 4000kv 8.5T Sensored Combo*. [cit. 2020-10-20]. Dostupné také z: <https://www.skyrc.eu/skyrc-cheetah-110-60a-4000kv-85t-sensored-combo-p-133.html>,
6. Amainhobbies. [online]. *LRP Power Pack 6-Cell NiMH Stick Pack Battery w/ Tamiya connector (7.2V/3000mAh)*. [cit. 2020-10-20]. Dostupné také z: <https://www.amainhobbies.com/lrp-power-pack-6cell-nimh-stick-pack-battery-w-tamiya-connector-7.2v-3000mah-lrp71115/p291936>>
7. Hitec MULTIPLEX. [online], *HS-5485HB Standard Karbonite Digital Sport Servo*. [cit. 2020-10-20]. Dostupné také z: <https://hitecrctd.com/products/servos/sport-servos/digital-sport-servos/hs-5485hb-standard-karbonite-digital-servo/product>,
8. ABSIMA. [online], *2-Channel Radio "CR2S.V2" 2.4 GHz incl. 2 Receiver*. [cit. 2020-10-20]. Dostupné také z: https://www.absima.shop/pp/absima-cr2s-vs-2-channel-remote-control-2-4ghz.htm?shop=absima_en&SessionId=&a=article&ProdNr=2000101&t=19114&c=19128&p=19128,
9. Akcelerometry. [online], *Prostředky automatického řízení*. [cit. 2020-10-22]. VŠB TUO. Dostupné také z: https://homel.vsb.cz/~jur286/prostredky_aut_rizeni/preklad.htm,
10. ARDUINO-SHOP.CZ. [online], *9DOF Gyroskop + Akcelerometr + Magnetometr MPU 9250 SPI/IIC Modul pro Arduino*. [cit. 2020-10-22]. Dostupné také z: <https://arduino-shop.cz/arduino/1330-9dof-gyroskop-akcelerometr-magnetometr-mpu-9250-spi-iic-modul-pro-arduino.html>,
11. HALUZA, Pavel. *Informatika v agrobyznysu: Přednáška 8: Počítačové sítě. Akela.mendelu.cz: studentský server* [online]. Mendelova univerzita v Brně [cit. 2020-11-10]. Dostupné také z: https://akela.mendelu.cz/~rybicka/prez/inagb/inagb_site2.pdf,
12. HLAVÁČOVÁ, Irena. *Materiály k předmětu Aplikovaná fyzika: Elektromagnetické záření*. VŠB TUO, 2009. Dostupné také z: http://kf.vsb.cz/Kontakt/Hlavacova/af_vyuka/elmag_zareni.doc,
13. Fotometrie: Elektromagnetické vlnění. *HomeL* [online]. VŠB TUO, 2015 [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~ale02/Bezpecnost_a_spolehlivost/ELMG_fotometrie.pdf,
14. DVORSKÝ, Marek. *Elektronické studijní opory Radiokomunikační technika I: 1. ZÁKLADNÍ POJMY RADIOKOMUNIKAČNÍ TECHNIKY*. VŠB TUO, 2018. Dostupné také z: <https://www.vsb.cz/edudocs/files/7b158bcb-0bc8-4129-b33d-26da95458fbb>,

15. DVORSKÝ, Marek. *Elektronické studijní opory Radiokomunikační technika I: 2+3 ANTÉNY*. VŠB TUO, 2018. Dostupné také z: <<https://www.vsb.cz/edudocs/files/15337c18-c25d-47b5-b68c-4a6cfe2c990b>>,
16. LANK, Vladimír a Miroslav VONDRA. *Fyzika v kostce: pro střední školy*. [cit. 2020-11-02]. Praha: Fragment, 2007. Maturita v kostce. ISBN 978-80-253-0228-6,
17. Brushless Outrunner Motor: Turnigy Aerodrive SK3 3530-1460kv. In: *HobbyKing* [online]. Hongkong [cit. 2020-11-11]. Dostupné z: <https://hobbyking.com/en_us/turnigy-aerodrive-sk3-3530-1460kv-brushless-outrunner-motor-1.html?queryID=&objectID=47279&indexName=hbk_live_magento_en_us_products>,
18. Sensorless Brushless Motor: TrackStar 380 3200KV. In: *HobbyKing* [online]. Hongkong [cit. 2020-11-11]. Dostupné z: <https://hobbyking.com/en_us/trackstar-380-sensorless-brushless-motor-3200kv.html?queryID=&objectID=47326&indexName=hbk_live_magento_en_us_products>,
19. Wemos D1 mini pinout. In: *Hadex* [online]. [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <https://www.hadex.cz/img/zbozi/m430j_1.jpg>,
20. ESP8266EX: *Datasheet*. In: *Espressif Systems* [online]. Shanghai [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <<https://www.hadex.cz/spec/m430j.pdf>>.

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu práce panu Ing. Jiřímu Kulhánkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a věcné připomínky, jež jsem využil při vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěl také poděkovat své rodině a blízkým za pochopení a podporu při studiu.

Tato diplomová práce vznikla za podpory projektu Pokročilé metody a technologie v oblasti řízení strojů a procesů - SP2021/27 financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.